

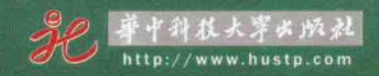
普通高等学校机械制造及其自动化专业“十二五”规划教材

顾　问　杨叔子　李培根　李元元

机电传动控制

主　编 ◎ 王晓初







普通高等学校机械制造及其自动化专业“十二五”规划教材

顾　问　杨叔子　李培根　李元元

机电传动控制

主　编　王晓初

副主编　胡兆勇　杨　杰　李克天

华中科技大学出版社

http://www.hustp.com

中国·武汉

内 容 提 要

全书共分九章：绪论，常用低压电器，电气图基础知识，电气控制系统基本控制电路，典型设备电气控制电路分析，设备电气控制系统设计，可编程控制器及其应用，直流电动机调速控制，交流电动机调速控制。

本书内容循序渐进、知识面较广、应用性强，可作为机械制造、机械电子工程以及与之相近专业的教材，也可供机械、电气工程等相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制/王晓初　主编. —武汉：华中科技大学出版社，2014.1
ISBN 978-7-5609-9642-4

Ⅰ.①机…　Ⅱ.①王…　Ⅲ.①电力传动控制设备-高等学校-教材　Ⅳ.①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 014548 号

机电传动控制　　王晓初　主编

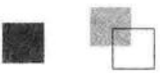
策划编辑：俞道凯
责任编辑：王　晶　吴　晗
封面设计：李　嫚
责任校对：封力煊
责任监印：张正林
出版发行：华中科技大学出版社(中国・武汉)
　　　　　武昌喻家山　　邮编：430074　　电话：(027)81321915
录　　排：武汉楷轩图文
印　　刷：湖北万隆印务有限公司
开　　本：710mm×1000mm　1/16
印　　张：20.5　　插页：2
字　　数：380 千字
版　　次：2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
定　　价：39.80 元



普通高等学校机械制造及其自动化专业“十二五”规划教材

编 委 会

前言



本书力求知识面广，内容由浅入深、结构紧凑、应用性强，尽量符合教学规律以及便于自学，在内容的选取和处理上，注重基础知识、基本原理以及实用性，同时也尽可能反映本领域近年来发展的最新技术。

全书共九章。第1章为绪论。第2、3、4章为电气控制基础知识，介绍了常用低压电器、电气控制原理图的阅读和绘制以及电气控制电路的逻辑表达式、典型基本电气控制电路的分析，除传统的基础内容外，还介绍了电动机保护器和电动机软起动器等现代电气控制元件。第5、6章为继电器控制技术的综合应用，包括典型设备电气控制电路的工作原理及分析、设备电气控制系统设计的有关知识。第7章为可编程控制器及其应用，以日本三菱公司的FX系列可编程控制器为例，讲述了PLC的基本知识、分类及结构、基本工作原理、工作方式、编程语言、编程指令，从应用角度出发，介绍了可编程控制器的编程方法和技巧。第8、9章为电动机调速技术的基本知识，直流调速系统内容包括有静差和无静差调速系统、双闭环调速系统、直流可逆调速系统及数字直流调速系统，交流调速系统内容包括交流调速的基本原理、变极调速、转子串电阻调速、串级调速、调压调速及变频调速。

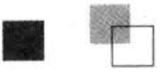
本书由王晓初主编，参加编写的有胡兆勇、杨杰、李克天。其中第1、6、7章由王晓初编写，第2、3、4章由胡兆勇编写，第5章由李克天编写，第8、9章由杨杰编写。全书由王晓初统稿和定稿。

由于编者水平有限，难免存在错误、疏漏和不妥之处，恳请读者给予批评指正。

编　者

2013年10月

目录



第1章　绪论 …… (1)
1.1　机电传动控制的目的和任务 …… (1)
1.2　机电传动及其控制系统的发展 …… (2)
1.3　本课程的内容及要求 …… (6)
思考与练习 …… (7)
第2章　常用低压电器 …… (8)
2.1　低压电器的定义和分类 …… (8)
2.2　电磁式低压电器的基本结构 …… (9)
2.3　动力电路开关电器 …… (11)
2.4　主令电器 …… (17)
2.5　接触器 …… (23)
2.6　继电器 …… (27)
思考与练习 …… (36)
第3章　电气图基础知识 …… (38)
3.1　电气图中的图形符号和文字符号 …… (38)
3.2　电气控制原理图的绘制方法 …… (39)
3.3　电气控制的逻辑表达式 …… (41)
思考与练习 …… (45)
第4章　电气控制系统基本控制电路 …… (47)
4.1　三相笼型感应电动机的起动控制 …… (47)
4.2　三相笼型感应电动机的正反向运行控制 …… (59)
4.3　三相笼型感应电动机的制动控制 …… (62)
4.4　三相笼型感应电动机的其他基本控制电路 …… (66)
4.5　自动循环工作控制电路 …… (70)
4.6　双速笼型感应电动机的调速控制 …… (76)
思考与练习 …… (80)
第5章　典型设备电气控制电路分析 …… (82)

5.1 概述 …… (82)
5.2 普通车床电气控制系统分析 …… (84)
5.3 卧式铣床电气控制系统分析 …… (90)
5.4 组合机床电气控制系统分析 …… (99)
5.5 数控机床电气控制线路分析 …… (108)
思考与练习 …… (114)
第6章 设备电气控制系统设计 …… (116)
6.1 电气控制系统设计的基本内容 …… (116)
6.2 常用电气元器件选择 …… (129)
6.3 电气控制电路原理图设计 …… (138)
6.4 电气控制系统的工艺设计 …… (147)
6.5 电气控制系统设计举例 …… (152)
思考与练习 …… (162)
第7章 可编程控制器及其应用 …… (164)
7.1 概述 …… (164)
7.2 可编程控制器的结构和工作原理 …… (171)
7.3 可编程控制器使用的元件 …… (179)
7.4 可编程控制器程序的表达方式 …… (190)
7.5 FX 系列 PLC 的基本指令 …… (192)
7.6 定时器(T)、计数器(C)的使用 …… (207)
7.7 步进梯形图指令 …… (217)
7.8 功能指令 …… (220)
7.9 可编程控制器的编程 …… (242)
7.10 可编程控制器的应用 …… (252)
思考与练习 …… (266)
第8章 直流电动机调速控制 …… (273)
8.1 直流调速控制系统的基本概念 …… (273)
8.2 单闭环直流调速系统 …… (278)
8.3 双闭环直流调速系统 …… (283)
8.4 直流可逆调速系统 …… (285)
8.5 数字化直流调速系统 …… (291)
思考与练习 …… (293)
第9章 交流电动机调速控制 …… (294)
9.1 交流调速的基本原理 …… (294)

9.2 简易调速系统 …………………………………………………………… (295)
9.3 串级调速 ……………………………………………………………… (297)
9.4 调压调速 ……………………………………………………………… (301)
9.5 变频调速 ……………………………………………………………… (305)
思考与练习 ……………………………………………………………………… (317)
附录 常用电气元件图形符号、文字符号一览表 …………………………… (318)
参考文献 ……………………………………………………………………… (322)

第1章 绪 论

1.1 机电传动控制的目的和任务

现代自动化生产设备早已不再是单纯的传统机械所组成的设备，而是机电一体化的综合系统，机电传动与电气控制已经成为现代生产机械中不可分割的重要组成部分。在现代自动化生产中，生产机械的电气自动化程度反映了工业生产的水平。

现代生产机械一般由工作机构、传动机构、原动机和自动控制系统四个部分组成。当原动机为电动机时，电动机通过传动机构拖动工作机构进行工作，这种传动方式称为机电传动。

机电传动控制系统包括电气拖动和电气自动控制两大部分。电气拖动部分包含电动机及传动机构，而电气自动控制部分(装置)则包括电气控制线路和电气操作部件。机电传动控制的目的是通过电气自动控制，实现电动机的起动、制动、反向、调速、快速定位以及控制加工轨迹等，完成各种加工工艺过程，保证生产过程的正常进行。

对于整个工厂来说，机电传动控制系统所要完成的任务就是要使机械设备、生产线、车间都实现自动化；而对于一台设备来说，则是指通过控制电动机拖动生产机械，实现产品质量的提高、生产成本的降低、产品数量的增加、工人劳动条件的改善以及能量的合理利用等。

科学技术特别是微电子技术的高速发展，为电气控制的进步提供了良好的条件。现代生产机械在电气自动控制方面综合应用了计算机技术、电子技术、传感器技术、伺服驱动技术等许多现代的先进科学技术。特别是微型计算机和可编程控制器在机械行业的广泛应用，使机械设备的自动化程序、加工效率、加工精度以及可靠性不断提高，同时也缩短了新产品的试制周期，加速了产品的更新换代，降低了生产成本和减轻了工人劳动强度。各种现代的机电一体化设

备，如洗衣机、数控机床、机器人、柔性制造系统、晶圆固晶机及焊线机、SMT 贴片机等，均使用了可编程控制器或工业计算机。由此可见，电气自动控制对于现代生产机械设备的发展有极其重要的作用。

1.2 机电传动及其控制系统的发展

机电传动控制的研究对象是机电传动的电气控制系统，而电气控制技术的发展与电气拖动的发展紧密相连。

1.2.1 电气拖动系统的发展

20 世纪初，由于电动机的出现，使得机械设备的拖动发生了变革，用电动机直接代替蒸汽机，机械设备的电气拖动随电动机的发展而发展。

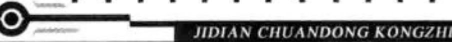
电气拖动主要分为直流拖动和交流拖动两大类。直流拖动是以直流电动机为动力，交流拖动则是以交流电动机为动力。由于直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能，可以很方便地在宽范围内实现平滑无级调速，所以在 20 世纪 30～60 年代，直流电动机及其调速系统在对调速性能要求较高和对速度需要精确控制的设备上得到了广泛应用。但由于直流电动机结构复杂、维护困难，使大容量、高转速和高电压直流电动机的制造受到限制。在交流电动机出现后，尤其是新型电力电子器件的出现，交流调速系统的关键技术得到突破，交流拖动系统逐渐取代了直流拖动系统。交流电动机因结构简单、运行可靠、使用及维护方便、价格便宜而得到了广泛应用。电动机不同，其电气控制系统也不同，目前交流拖动系统在生产机械中占据主导地位。

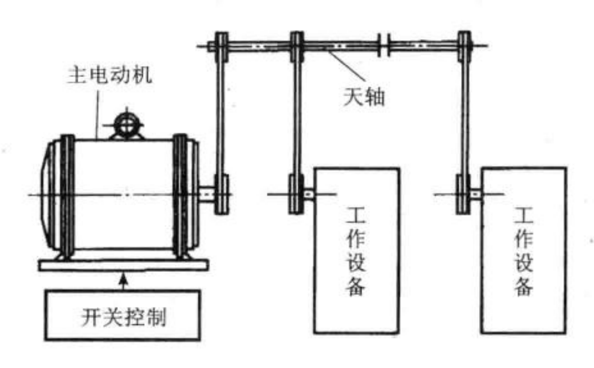
在生产机械中，常用的交流电动机主要有笼型感应电动机和绕线转子感应电动机，即鼠笼式异步电动机和绕线式异步电动机，这两种电动机统称为感应电动机或异步电动机。

如图 1-1 所示，通常认为电气拖动经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。

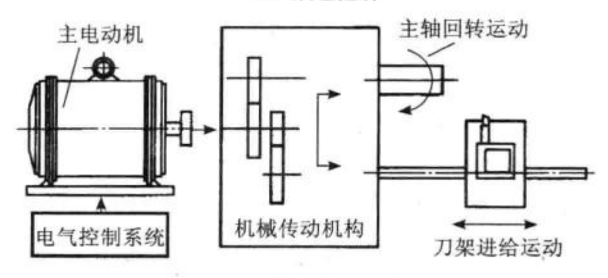
1. 成组拖动

由一台电动机拖动一组机械设备，称之为成组拖动。成组拖动是由一台电动机拖动一根天轴，再由天轴通过皮带轮和皮带拖动各台机械设备。这种拖动

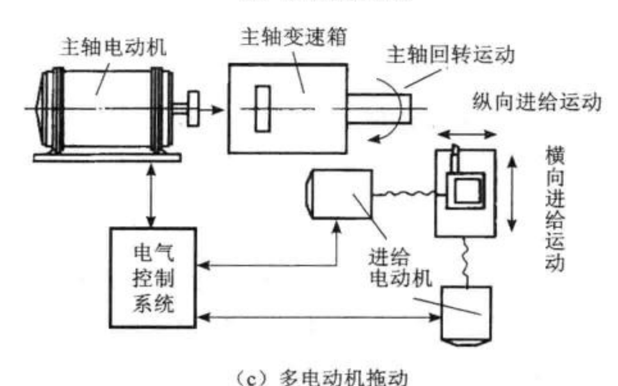




(a) 成组拖动



(b) 单电动机拖动



(c) 多电动机拖动

图 1-1 设备电气拖动方式

方式机构复杂、传递路径长、损耗大、效率低、生产灵活性小，已被淘汰。

2. 单电动机拖动

20 世纪 20 年代，出现了单独拖动形式，即由一台电动机拖动一台设备，称为单电动机拖动。与成组拖动相比，这种拖动方式简化了传动机构，缩短了传动路径，提高了传动效率。如普通车床就采用这种单电动机拖动形式。但这种



拖动方式仍然存在机械传动链长、传动机构复杂、加工精度难以控制等缺点，并且不易实现设备工作的自动化。

3. 多电动机拖动

所谓多电动机拖动就是由多台电动机分别拖动同一台设备中不同的运动机构，即设备中的每个工作运动都由单独的电动机拖动。如数控车床的主轴转动和刀架移动分别由主轴电动机和进给电动机拖动。由于电动机的动力直接传递到运动执行件上，取消了通过机械传动链分配动力的机构，从而简化了设备的机械机构，提高了传动效率和传动精度，各运动部件能够选择最合理的运动速度，缩短了加工时间，而且便于分别控制，易于实现各运动的自动控制。多电动机拖动已经成为现代机械设备最基本的拖动形式。

随着技术的发展及设备负载和运动动作的要求，除使用电动机作动力外，还采用压力液体和压力空气作为设备工作的动力，这种拖动方式已被广泛地应用于现代设备中，同时也形成相应的控制系统。

1.2.2 电气控制系统的发展

随着电气拖动方式的演变，电气拖动的控制方式也由手动控制逐步发展至自动控制。电气控制系统是伴随着电气控制器件的发展而发展的，主要体现在电气控制技术和电动机调速技术的不断进步。

1. 电气控制技术的发展

电气控制技术的发展主要体现在：在控制方法上，从手动控制向自动控制发展；在控制功能上，从单一功能向多功能发展。电气控制技术的发展主要经历了以下几个阶段。

1）手动控制

手动控制是采用一些手动电器（如刀开关）来直接控制执行电器（如电动机）。它适合容量小、动作单一的设备（小型台钻、砂轮机等）。

2）继电器接触器控制

20 世纪 20～30 年代出现了继电器接触器控制，它采用继电器、接触器、位置开关和保护元件等，实现对控制对象的起动、停车、调速、制动、自动循环以及保护等控制。由于它所使用的控制器件结构简单、价格低廉，控制方式直观、易掌握、工作可靠、易维护，因此，在机械设备的控制上得到了长期、广泛的应用。其主要缺点是改变控制程序困难，由于控制线路接线固定，一旦工艺程序有所变动，就得重新配线，满足不了对程序经常改变、控制要求比较复杂的系统要求；同时还存在体积大、功耗大、控制速度慢等不足；此外，由于是有触点控制，

工作频率低，触点易损坏，在控制复杂时，使系统可靠性降低。

3）顺序控制器控制

为了解决控制系统复杂和控制程序可变的需要，在20世纪60年代初出现了顺序控制器。它是继电器和半导体综合应用的控制装置，通过编码、逻辑组合来控制流程，适用于控制程序需要改变的场合。它具有通用性强、程序可变、编程容易、可靠性高和使用维护方便等特点，被广泛应用于机械手、组合机床和生产自动线上。

4）可编程控制器控制

随着计算机技术的发展，20世纪60年代末又出现了以微型计算机为基础，具有编程、存储、逻辑控制及数字运算功能的可编程控制器(PLC)，它是一种专用的微型计算机。PLC的设计以工业控制为目标，具有功率级输出、接线简单、通用性强、编程容易、抗干扰能力强以及工作可靠等一系列优点，它一问世即以强大的生命力，大面积地占领了传统控制领域。当今的PLC还具有模拟量调节、伺服控制以及联网通信等工业自动控制需要的所有功能。PLC已成为机械设备中的主要电气控制装置。

5）数字控制

数字控制(NC)是电气控制发展的另外一个重要方面，它综合应用电子技术、计算机技术、现代控制理论、精密测量技术、伺服驱动技术等现代科学技术形成数控系统。最初的数控系统由硬件逻辑电路组成，它灵活性差、可靠性不够。随着价格低廉、工作可靠的微型计算机的发展，数控系统的硬件已为微机所取代，成为计算机数控(CNC)。在现代设备中，计算机数控系统能实现精确的速度控制、位置控制以及轨迹控制，已被广泛地用在各种数控化设备中，数控机床即是典型的数控系统用于机床的产物。

2. 设备调速技术的发展

通常，在设备进行生产时，需要根据控制指令或工艺要求，对加工速度进行调节。常用的设备调速系统有如下几种。

1）机械有级调速系统

在机械有级调速系统中，电动机采用不调速的电动机，而速度的调节是通过改变齿轮箱的变速比来实现的。在这种系统中，负载转矩是经机械传动机构传到电动机轴上的，电动机轴上的转矩只是负载转矩传动比的倍数，可以选择转矩较小的电动机，但机械系统变得复杂，影响了设备的加工精度。在普通车床、钻床、铣床中，一般都采用这种机械有级调速系统。

2）电气-机械有级调速系统



在机械有级调速系统中，使用多速感应式异步电动机代替不能调速的感应式异步电动机，可以简化传动机构，这样的系统就是电气-机械有级调速系统。多速电动机一般采用双速电动机，少数设备采用三速、四速电动机。

3）电气无级调速系统

通过直接改变电动机的转速来实现设备之工作机构转速的无级调速拖动系统，称为电气无级调速系统。这种调速系统具有调速范围宽、可以实现平滑无级调速、调速精度高、控制灵活等优点，同时能大大简化设备的机械传动机构，因而在现代化设备中得到了广泛应用。

电气无级调速系统主要分为直流无级调速系统和交流调速系统两大类。

由于直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能，可以很方便地在宽范围内实现平滑无级调速，在 20 世纪 30 年代以后，直流无级调速系统在重型和精密机床上得到了广泛应用。20 世纪 60 年代以后，由于大功率晶闸管的问世、大功率整流技术和大功率晶体管的发展，晶闸管直流电动机无级调速系统取代了直流发电机-直流电动机、电磁放大机等直流调速系统，采用脉宽调制的直流调速系统也得到了广泛应用。

由于交流电动机具有结构简单、造价低以及容易维护等特点，交流电动机拖动系统在设备中占主导地位。20 世纪 80 年代以后，随着电力电子技术、大规模集成电路和计算机控制技术的发展，以及现代控制理论的应用，交流电动机调速系统有了突破性进展，高性能交流调速系统在机械设备中应用越来越广泛。特别是以鼠笼式交流伺服电动机为对象的矢量控制技术，矢量交流调速系统具有了与直流调速相当的优越调速性能。交流调速的单机容量和转速可大大高于直流电动机，且交流电动机无电刷和换向器，易于维护，可靠性高，能用于有腐蚀性、易爆性、含尘气体等特殊环境中。交流变频调速、矢量控制伺服单元以及交流伺服电动机等交流调速技术正逐步取代直流调速技术，成为电机传动技术的主流选择，并得到了广泛应用。

1.3 本课程的内容及要求

"机电传动控制"是研究解决机电传动的电气控制有关问题，阐述有关机电传动电气控制的原理、实际机电设备的控制线路、电气控制线路的设计方法、常用电气元件的原理和选择、可编程控制器以及交直流调速系统等。本书只涉及

最基本、最典型的控制线路及控制实例。

本课程的先修内容是电工学、微机原理及应用、机床。

学完本课程以后,应掌握电气控制的基本原理,学会分析一般设备的电气控制线路,并具有一定的设计能力,了解电气无级调速的主要类型、工作原理及其应用,对可编程控制器应具有基本的运用能力。

综上所述,机电传动的电气控制是各类设备的重要组成部分,因此对机械制造专业学生及设备设计人员来说,应该掌握机电传动控制的基本原理和方法。

思考与练习

1. 机械设备电气控制系统的主要任务是什么?
2. 电气拖动系统的发展经历了哪几个阶段?
3. 简述电气控制技术的发展历程。
4. 简述调速技术的发展历程。

第2章 常用低压电器

2.1 低压电器的定义和分类

2.1.1 低压电器的定义

电器是指一种能够根据外界信号的要求，手动或自动地接通或断开电路、断续或连续地改变电路参数的电气元件或设备，其作用是实现电路或用电设备的切换、控制、保护、检测、变换和调节。

按照电器所在电路的工作电压等级，电器可分为高压电器和低压电器。低压电器通常是指工作在交流1200 V或直流1500 V及以下电路中的电器。

2.1.2 低压电器的分类

低压电器的种类繁多，功能多样，具体可按如下方式进行分类。

1. 按动作方式

按照触点闭合的动作方式，低压电器可分为手动电器和自动电器。

由人工直接操作才能完成任务的电器称为手动电器，如按钮、刀开关等；不需要人工直接操作，由自身参数变化或外来信号作用，通过电或非电信号自动完成通断电路任务的电器称为自动电器，如接触器、熔断器等。

2. 按工作原理

按照电器的工作原理，低压电器可分为电磁式电器和非电量控制电器。

电磁式电器是根据电磁感应原理来工作的电器，如接触器、电磁式继电器；非电量控制电器是靠外力或非电物理量（压力、速度、时间、温度等）变化而动作的电器，如刀开关、行程开关、速度继电器等。

3. 按控制对象

按照电器在线路中位置决定的控制对象，低压电器可分为配电电器和控制电器。

配电电器主要用于低压配电电路中，用于电能的输送和分配，以及对电路及设备进行保护、通断与转换，如刀开关、低压断路器等；控制电器主要用于控制各种受电设备，使其达到预期要求的工作状态，如按钮、接触器等。

4. 按有无触点

按照电器是否存在触点，低压电器可分为有触点电器和无触点电器。

有触点电器具有可分离的动触头和静触头，利用触头的闭合和断开来实现电路的通断控制，如按钮、接触器等；无触点电器没有硬触头，是指电器输出部分为晶体管等类型的电子开关。

5. 按功能用途

按照电器的功能，低压电器可分为执行电器、主令电器、开关电器、检测电器和保护电器。

执行电器是接通或断开电动机主电路或直接用来带动生产机械运行的一种电器，如接触器、电磁离合器等。主令电器是用于发送动作指令的电器，如按钮、转换开关等。开关电器主要作用是实现对电路通断控制，常作为电源的引入开关、局部照明电路的开关和小容量电动机的起停控制，如刀开关、低压断路器等。检测电器是将电或非电的模拟量转换为开关量的电器，如时间继电器、速度继电器等。保护电器是保护电动机及设备正常运行的电器，如熔断器、热继电器等。

2.2 电磁式低压电器的基本结构

在常用的低压电器中，电磁式电器占有十分重要的地位，具有广泛的应用。电磁式电器的类型有很多，从结构上看，电磁式电器一般由两个基本部分组成，即感受部分和执行部分。感受部分接受外界输入信号，并通过转换、放大，使执行部分动作；执行部分则按照感受部分的反应进行相应的动作，从而接通或断开电路，实现控制的目的。对于有触点的电磁式电器来说，感受部分为电磁机构，执行部分为触头系统。

2.2.1 电磁机构

电磁机构的作用是将电磁能量转换为使触头动作的机械能量，从而实现触头状态的改变，完成电路通、断的控制。

电磁机构通常采用电磁铁的形式，由线圈、铁芯、衔铁等几部分组成，其结构如图2-1所示。其工作原理是：线圈通过工作电流产生足够的磁动势，在磁路中形成磁通，使衔铁获得足够的电磁力，以克服弹簧反作用力，并与铁芯吸合，再由连接机构带动相应的触头动作。

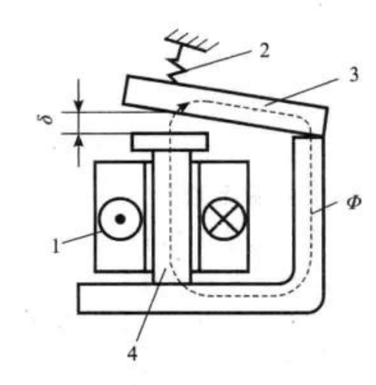
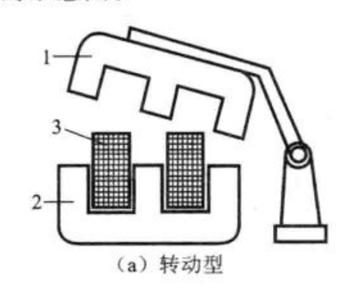


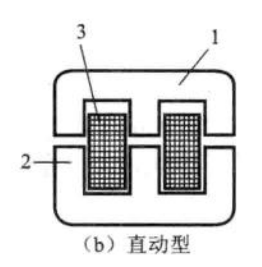
图 2-1　电磁机构结构和原理

1—线圈；2—弹簧；3—衔铁；4—铁芯

按照衔铁的运动形式来分，电磁机构一般具有转动和直动两种类型。图 2-2 所示为这两种类型的示意图。



（a）转动型



（b）直动型

图 2-2　电磁机构运动形式

1—衔铁；2—铁芯；3—线圈

2.2.2 触头系统

触头是有触点电器的执行部分，其作用是接通或断开电路，因此要求触头有良好的接触性能。触头通常采用具有良好导电、导热性能的材料制成。

从接触形式来看，有点接触、线接触和面接触三种形式。点接触适用于电流不大的场合；线接触适用于接触次数多、电流大的场合；面接触适用于大电流的场合。图 2-3 所示为触头的接触形式。

触头的结构形式有桥式触头和指形触头两种。桥式触头有两对触头对称布局，这两对触头串接于同一电路，通常有点接触和面接触两种形式；指形触头

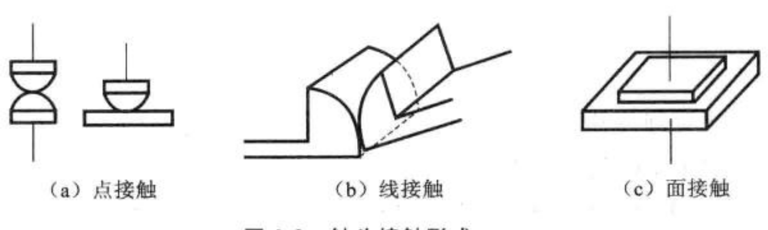


图 2-3 触头接触形式

一般为线接触,触头动作时产生滑动摩擦,利于去掉氧化膜。图 2-4 所示为触头的结构形式。

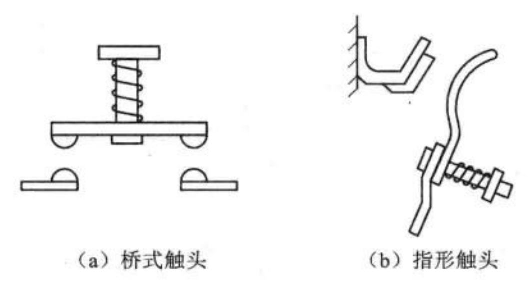


图 2-4 触头结构形式

触头包含静触头和动触头,按两者之间的初始状态,可分为常开触点(也称动合触点)和常闭触点(也称动断触点)。图 2-5 为两种触点的示意图。

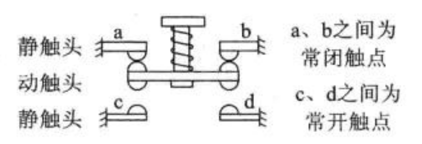


图 2-5 常开和常闭触点

2.3 动力电路开关电器

低压开关电器主要作隔离、转换及接通和分断电路用,多数作电源开关或控制开关用,也可直接用来控制小容量电动机的起动、停止和正反转。常见的有刀开关、负荷开关、低压断路器和转换开关。

2.3.1 刀开关

刀开关也称闸刀开关，具有刀形触片的各类开关电器的总称，由触刀 2、静插座（3、4）、绝缘底板 5、操纵手柄 1 组成。图2-6为刀开关的结构示意图。

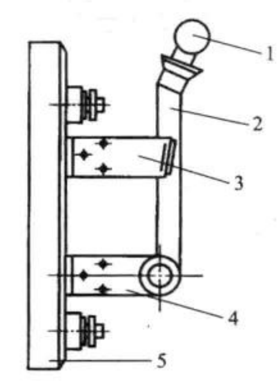


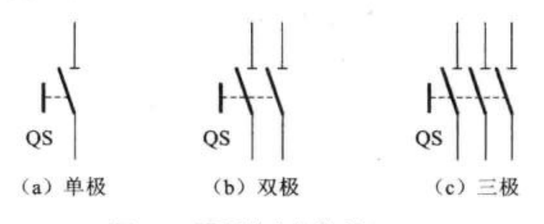
图 2-6 刀开关结构

1—操纵手柄；2—触刀；3、4—静插座；5—绝缘底板

刀开关按照极数可以分为单极刀开关、双极刀开关和三极刀开关。按照转换方式分为单投式刀开关和双投式刀开关。

在对电气设备进行维修时，须将设备从电网中脱开并隔离，隔离开关就起着这种隔离电源的作用。在隔离开关分闸后，建立可靠的绝缘间隙即开关断口，将需要检修的设备或线路与电源用一个明显的断开点隔开，以保证检修人员和设备的安全。隔离开关没有灭弧装置，因此一般不允许带负荷操作，但在一定条件下，允许接通或断开小功率电路。隔离开关的文字符号为QS，俗称的闸刀开关属于隔离开关的一种。

刀开关的电气符号如图 2-7 所示。



（a）单极　（b）双极　（c）三极

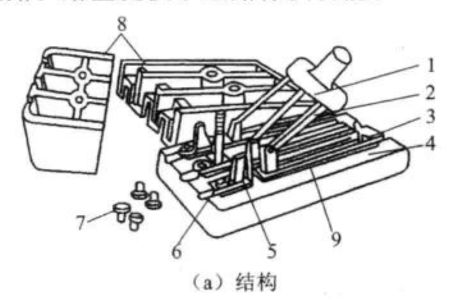
图 2-7 刀开关电气符号

2.3.2 负荷开关

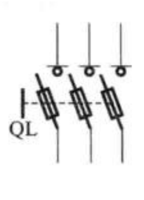
当刀开关与熔断器串联组合时便形成了熔断器式刀开关，称为负荷开关，也称为开关熔断器组。一般用于不经常操作的低压电路中，以接通或切断电源，也可用于不频繁地接通和分断小容量的电动机。小容量的低压负荷开关触头的分合速度与手柄操作速度有关。容量较大的低压负荷开关的操作机构需安装快断机构，采用弹簧储能动作原理，分合速度与手柄操作速度的快慢无关。负荷开关又分为开启式负荷开关和封闭式负荷开关两大类。

1. 开启式负荷开关

开启式负荷开关又名胶盖开关或胶壳开关，由瓷底座4、静插座5、熔丝9、胶盖8、紧固螺帽7、瓷质手柄1和触刀2等组成，瓷底座上还装有进线座6和出线座3。其结构和电气符号如图2-8所示。当闸刀合上时，操作人员不会触及带电部分。胶盖具有下列保护作用：①将各极隔开，防止因极间飞弧导致电源短路；②防止电弧飞出盖外，灼伤操作人员；③防止金属零件掉落在闸刀上形成极间短路。熔丝提供了短路保护功能。



(a) 结构



(b) 电气符号

图 2-8　开启式负荷开关结构和电气符号

1—瓷质手柄；2—触刀；3—出线座；4—瓷底座；5—静插座；
6—进线座；7—紧固螺帽；8—胶盖；9—熔丝

这种负荷开关常用作照明电路的电源开关，也可用于5.5 kW以下小型电动机不频繁手动起动和停止的控制。安装时电源线应接在静触头一边的进线端，负载线应接在触刀一边熔体后的出线端。这样确保当开关断开时，熔体均不带电，以保证更换熔体时的安全。此外，当胶壳开关垂直安装时，在合闸状态下瓷柄应该向上，以防止松动落下时误合闸。

2. 封闭式负荷开关

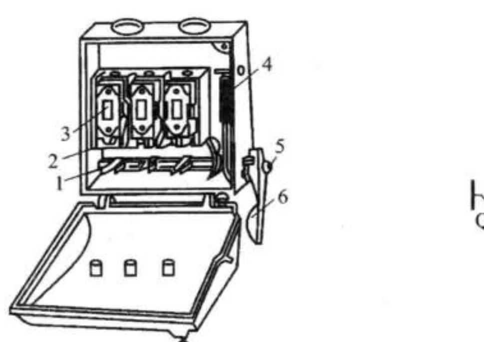
封闭式负荷开关俗称铁壳开关，由刀片1、静触头2、熔断器3、操作机构(5、6)、灭弧装置和钢板(或铸铁)外壳等组成，通常在内部还安装有速断弹簧4。其结构和电气符号如图2-9所示。

铁壳上装有机械联锁装置，当箱盖打开时，手柄不能操纵开关合闸；当开关合闸时，箱盖不能打开。

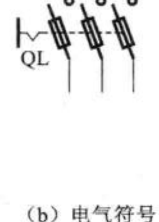
负荷开关一般具有简单的灭弧装置，可以带负荷通、断电路。负荷开关中有熔断器，可以切断短路故障的电路。

2.3.3　低压断路器

低压断路器也称自动开关或空气开关，常用作低压配电的总电源开关，也



（a）结构



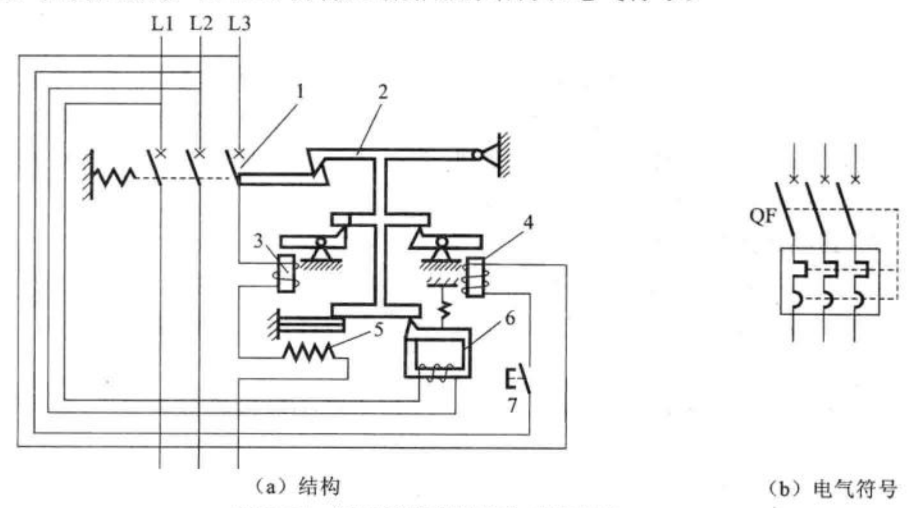
（b）电气符号

图 2-9　封闭式负荷开关结构和电气符号

1—刀片；2—静触头；3—熔断器；4—速断弹簧；5、6—操作机构

可用于不频繁手动接通和分断电路的场合。当电路发生短路、过载和欠电压时，能自动切断电路，即具有短路、过载和欠压保护功能。

尽管各种低压断路器形式各异，但其基本结构和动作原理都相同。低压断路器一般由触头系统、灭弧系统、操纵机构和各种可供选择的脱扣机构（保护装置）等部分组成。图 2-10 为低压断路器的结构和电气符号。



（a）结构　　（b）电气符号

图 2-10　低压断路器结构和电气符号

1—主触头；2—自由脱扣器；3—过电流脱扣器；4—分励脱扣器；
5—热脱扣器；6—欠压脱扣器；7—按钮

低压断路器具有三对主触头，有的断路器还有辅助触头和报警触头。

主触头是靠手动操作或电动合闸机构来实现合闸的。合闸后，三对主触头处于闭合状态。主触头闭合后，自由脱扣器将主触头锁在合闸位置上。

与断路器主电路分、合机构机械上联动的辅助触头主要用于断路器分、合状态的显示，将该辅助触头接在电气控制电路中，通过断路器的分合，对其相关电器实施控制或联锁。例如向信号灯、继电器等输出信号。断路器的辅助触头类似于接触器的辅助触头。

当断路器因负载出现过载、短路或欠电压故障而脱扣时，断路器的报警触头动作闭合，接通辅助线路中的指示灯或电铃、蜂鸣器等，以显示或提醒断路器因故障而脱扣。报警触头也可称为信号触头。

辅助触头和报警触头在断路器中是根据需要配备的。

低压断路器的脱扣机构通常有如下四种。

1. 过电流脱扣器

过电流脱扣器的线圈 3 与主电路串联。电路正常工作时，线圈流过的电流所产生的电磁吸力不足以使衔铁吸合。当电路发生短路或严重过载时，线圈产生的电磁吸力增大，使过电流脱扣器的衔铁吸合，从而撞击杠杆，使自由脱扣机构动作，主触点断开主电路。

2. 欠压脱扣器

欠压脱扣器的线圈 6 和电源并联。电路正常工作时，欠压脱扣器的衔铁被吸合。当电路欠压或失压时，欠压脱扣器的电磁吸力减小，衔铁在弹簧力作用下撞击杠杆，使自由脱扣机构动作，主触点断开主电路。

3. 热脱扣器

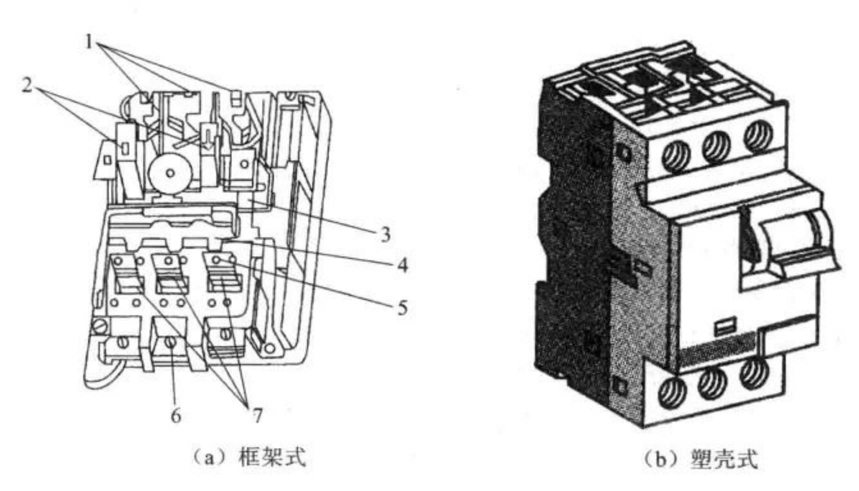
热脱扣器的热元件 5 与主电路串联。当电路过载一定时间后，热脱扣器的热元件发热使双金属片向上弯曲，推动自由脱扣机构动作，主触点断开主电路。跳闸后，需待双金属片冷却复位后才能再合闸。

4. 分励脱扣器

当需要远距离控制时，则需要采用分励脱扣器 4。分励脱扣器由分励电磁铁和一套机械装置组成。在正常工作时，其线圈是断电的。在需要远距离断开电路时，按下跳闸按钮 7，使分励电磁铁线圈通电，衔铁带动自由脱扣机构动作，使主触点断开。分励脱扣器只用于远距离断电操作，不能用作电路保护。

从结构形式上，低压断路器有框架式(万能式)和塑壳式(装置式)两大类。如图2-11所示。

断路器与隔离开关的区别在于，断路器能在带负荷情况下接通和断开电路，并且具有短路、过载和欠压的保护功能。



(a) 框架式　　(b) 塑壳式

图 2-11　低压断路器示意图

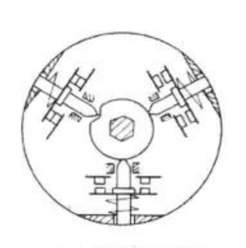
1—电磁脱扣器；2—按钮；3—自动脱扣器；4—动触头；5—静触头；6—接线柱；7—热脱扣器

2.3.4　转换开关

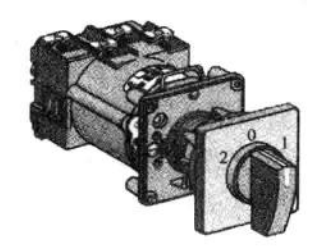
转换开关又称组合开关。它是一种具有多操作位、多组触头的手动电器，可实现多组触点组合进行电路转换控制。在电气线路中，它常被用作电源引入的开关，可以接通和分断小电流电路，可以用来直接控制小功率电动机的起停或正反转。

当操作位置和触头数量更多时，也可称为万能转换开关。由于控制路数较多，更适合于电气控制电路的换接；当触头容量大时，也可用于小容量电动机的直接控制。

转换开关的结构如图 2-12 所示，主要由触点座、凸轮、转轴、定位结构、螺杆和手柄等组成。



(a) 结构原理图



(b) 示意图

图 2-12　转换开关结构图

其电气符号如图 2-13 所示。

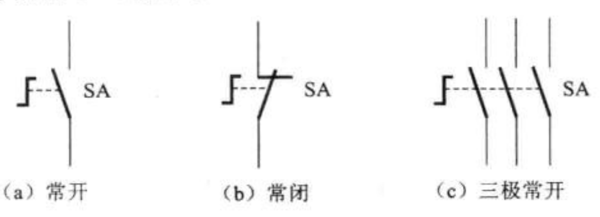


图 2-13 转换开关电气符号

2.4 主令电器

主令电器是用于发送控制命令或信号的电器，用来接通和分段控制电路，广泛应用于各种电气控制电路中。主令电器种类繁多，主要有按钮、转换开关、行程开关、接近开关和光电开关。

2.4.1 按钮

按钮是一种结构简单、应用广泛的手动主令电器，也称控制按钮。通常用于小电流电路中发出起动或停止等指令，以控制接触器、继电器等，从而实现主电路的接通和断开。

按钮一般由按钮帽、复位弹簧、触头和外壳组成。图2-14为按钮的结构示意图。

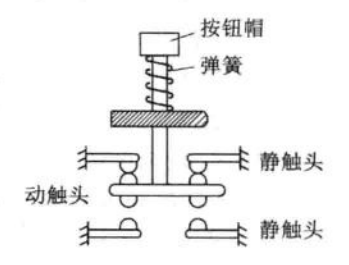
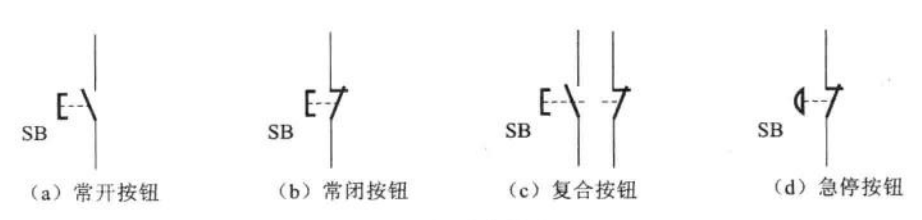


图 2-14 按钮结构示意图

按钮从外形和操作方式上可以分为平钮和急停按钮，急停按钮也叫蘑菇头按钮。除此之外，还有钥匙钮、旋钮、拉式钮、万向操纵杆式、带灯式等多种类型。按钮根据触点结构的不同，分为常闭按钮、常开按钮和复合按钮。图 2-15 所示为按钮的电气符号。

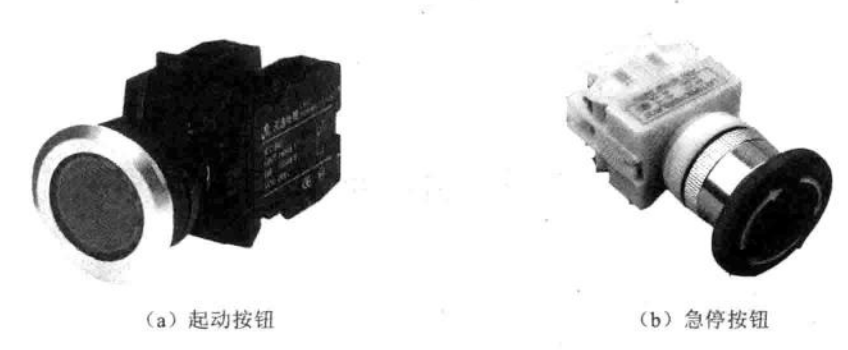
按钮一般是按下时动作，松开后自动复位。也有带机械自锁的按钮，即按下时动作，松开后按钮不复位，需再次按下松开后才能复位。

为便于识别各个按钮的作用，避免误操作，通常在按钮上标出不同标识或涂上不同颜色，一般红色表示危险情况下的操作或停止，绿色表示起动。图2-16给出了常见的按钮实物图。



(a) 常开按钮　(b) 常闭按钮　(c) 复合按钮　(d) 急停按钮

图 2-15　按钮电气符号



(a) 起动按钮　(b) 急停按钮

图 2-16　按钮实物图

2.4.2　万能转换开关

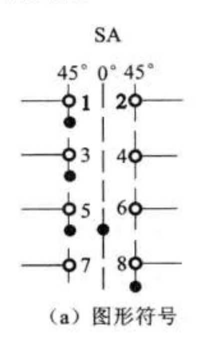
万能转换开关是具有更多操作位置和触点并能换接多个电路的一种手控主令电器。主要用于控制电路换接，也可用于小容量电动机的起动、换向、调速和制动控制，以及可用于各种配电装置的远距离控制。由于触点挡数多、换接的线路多(最多可达 32 条)，用途广泛，故称为万能转换开关。

万能转换开关的结构与转换开关类似，也是由触点座、凸轮、转轴、定位结构、螺杆和手柄等组成。

常用产品有 LW5 和 LW6 系列。LW5 系列可控制 5.5 kW 及以下的小容量电动机；LW6 系列只能控制 2.2 kW 及以下的小容量电动机。用于可逆运行控制时，只有在电动机停车后才允许反向起动。LW5 系列万能转换开关按手柄的操作方式可分为自复式和定位式两种。所谓自复式是指用手拨动手柄于某一挡位时，手松开后，手柄自动返回原位；定位式则是指手柄被置于某一挡位时，不能自动返回原位而停在该挡位。

万能转换开关的手柄操作位置是以角度表示的。电气图中的图形符号如图 2-17(a)所示。但由于其触头的分合状态与操作手柄的位置有关，所以，除在电气图中画出图形符号外，还应画出如图 2-17(b)所示的操作手柄与触头分合

状态之间的关系。



(a) 图形符号

LW5-15D0403/2				
触头编号		45°	0°	45°
—⁄—	1—2	×		
—⁄—	3—4	×		
—⁄—	5—6	×	×	
—⁄—	7—8			×

(b) 通断表

图 2-17 万能转换开关的图形符号及触点通断表示法

图 2-17(a)中，每一条虚的竖线表示手柄位置，每一条横线表示一路触点。哪一路接通就在代表该位置虚线上的触点下面用黑点“•”表示。触点通断用通断表来表示，图 2-17(b)中，“×”表示触点闭合，空白表示触点断开。图中用度数来表示手柄的位置，也常用 0、Ⅰ和Ⅱ等字符来表示。

2.4.3 行程开关

行程开关是依据生产机械的移动距离发出控制指令，以控制其运行方向或移动距离的主令电器。若将行程开关安装于生产机械行程中的某一点处，以限制其行程，则称为限位开关。行程开关的工作原理和按钮相同，区别在于它不是靠手的按压，而是利用生产机械运动部件的碰压来使触头动作。

行程开关广泛用于各类机床和起重机械中，用以控制其行程、进行终端限位保护。行程开关按其结构可分为直动式、滚轮式、微动式和组合式。

直动式行程开关的结构原理如图 2-18(a)所示，其动作原理与按钮开关相同，也称为按钮式行程开关。但其触头的分合速度取决于生产机械的运行速度，不宜用于速度低的场所。

滚轮式行程开关的结构原理如图 2-18(b)所示，当被控机械上的撞块撞击滚轮时，撞杆转向左边，带动凸轮转动，压下推杆，使微动开关中的触点迅速动作，这种行程开关也称为旋转式行程开关。当运动机械返回时，在复位弹簧的作用下，各部分动作部件复位。

微动式行程开关的结构原理如图 2-18(c)所示，它的操作力和动作行程均很小。这种开关具有弯片式弹簧顺动机构，动作时推杆被压下，弹簧变形，储存能量；当推杆向下到达顶点位置时，弹簧连同动触点产生瞬时跳跃，以实现触点

的动作。微动式行程开关具有触点动作灵敏、动作速度快、与机械挡铁运行速度无关的优点，其缺点是触点电流容量小、操作头的行程短和易损坏。

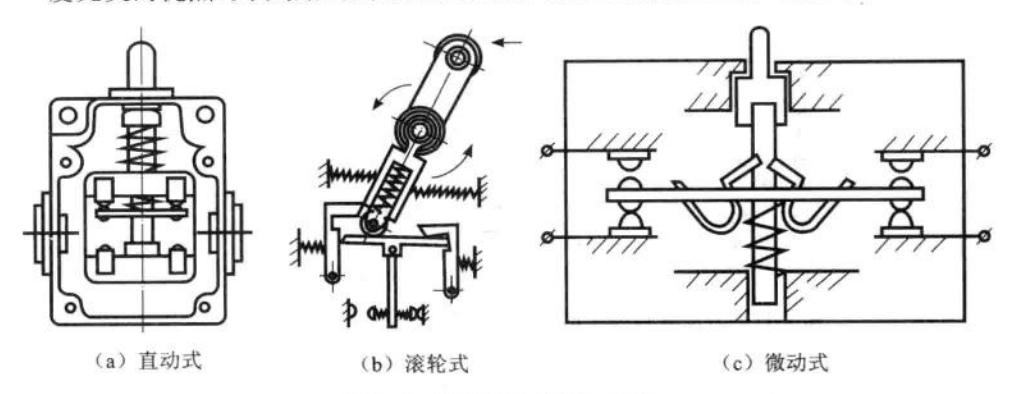


图 2-18 行程开关结构示意图

行程开关的电气符号如图 2-19 所示。

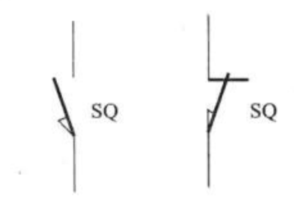


图 2-19 行程开关电气符号

2.4.4 接近开关

在各类开关中，有一种对接近它的物件有“感知”能力的元件即位置传感器。利用位置传感器对接近物体的敏感特性达到控制开关通或断的目的，这就是接近开关。接近开关又称为无触点行程开关，它可以完成行程控制和限位保护；它也是一种非接触型的检测装置，可以用作检测零件尺寸和测速等，也可用于变频计数器、变频脉冲发生器、液面控制和加工程序的自动衔接等。它具有工作可靠、寿命长、功耗低、操作频率高以及适应恶劣工作环境等特点。

当有物体移向接近开关，并接近到一定距离时，位置传感器才有“感知”，开关才会动作。通常把这个距离称为检出距离。不同的接近开关，检出距离也不同。

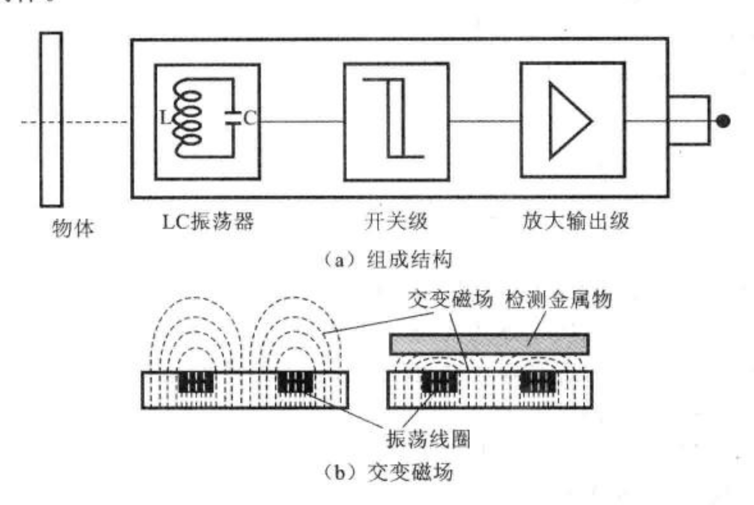
有时被检测物体是按一定的时间间隔，一个接一个地移向接近开关，又一个一个地离开，这样不断地重复。不同的接近开关，对检测对象的响应能力是

不同的。这种响应特性被称为响应频率。

根据对物体"感知"方法的不同，常见的接近开关有以下几种。

1. 电感式接近开关

电感式接近开关有时也称涡流式接近开关，其结构及工作原理如图 2-20 所示。电感式接近开关由三大部分组成：LC 高频振荡器、开关电路及放大输出电路。振荡器用于产生一个交变磁场，当金属物体接近这一磁场并达到感应距离时，在金属物体内产生涡流，从而导致振荡衰减以至停振，振荡器振荡及停振的变化被后级放大电路处理并转换成开关信号。这种接近开关所检测的物体必须是金属体。



(a) 组成结构

(b) 交变磁场

图 2-20 电感式接近开关结构及工作原理

2. 电容式接近开关

电容式接近开关的感应面由两个同轴金属电极构成，很像"打开的"电容器电极。这两个电极构成一个电容，串接在 RC 振荡回路内。电源接通时，RC 振荡器不振荡。当有物体移向接近开关时，不论它是否为导体，总会使电容的介电常数发生变化，使电容量发生变化，振荡器开始振荡，产生开关信号，从而检测有无物体的存在。该传感器能检测金属物体、非金属物体、绝缘的液体或粉状物等。对金属物体可以获得最大的动作距离，对非金属物体的动作距离取决于材料的介电常数，材料的介电常数越大，可获得的动作距离越大。

图 2-21 给出了电容式接近开关的工作原理。

3. 霍尔接近开关

霍尔元件是一种磁敏元件。利用霍尔元件做成的开关称为霍尔开关。当

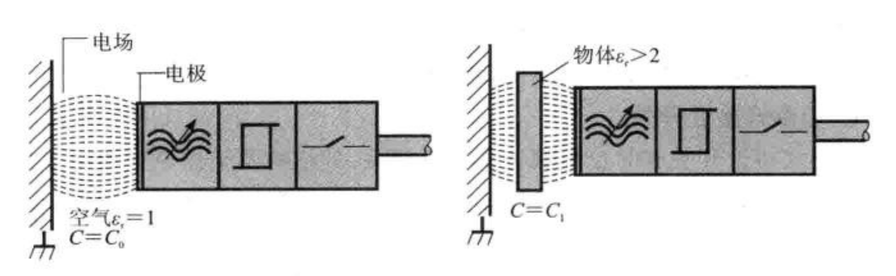


图 2-21 电容式接近开关工作原理

磁性物体移近霍尔开关时，线圈铁芯的导磁性变小，线圈的电感量也减小，振荡器振荡，由此识别附近有磁性物体存在，进而控制开关的通或断。这种接近开关的检测对象必须是磁性物体。

2.4.5 光电开关

光电开关是通过对光的感应来产生开关信号的，它可用来检测物体的有无。

光电开关由光发射器、光接收器和检测电路三部分组成。光发射器发射的多为红外光或激光；光接收器为光电二极管或光电三极管，有的接收器在光接收端装有光学元件（如透镜等）。检测电路的主要功能是将接收光的有/无转换为高/低电平的开关信号。

按照检测方式，常用的光电开关可分为对射式、反射式和漫反射式三种。

1. 对射式光电开关

对射式光电开关也称直通光束式光电开关，其工作原理如图 2-22(a)所示。它的发射器和接收器相互分离且光轴相对放置。当被检测物体经过发射器和接收器之间且阻断光线时，光电开关输出高/低电平信号；当被检测物体离开即不遮挡光线时，发射器发出的光线直接进入接收器，光电开关输出低/高电平信号。

2. 反射式光电开关

反射式光电开关也称镜面反射式光电开关，其工作原理如图 2-22(b)所示。反射式光电开关是集发射器与接收器于一体，发射器发出的光线经过反射器，反射回接收器。当被检测物体经过且完全阻断光线，然后再离开时，光电开关输出高/低电平信号。

3. 漫反射式光电开关

漫反射式光电开关也是集发射器与接收器于一体，其工作原理如图 2-22

(c)所示。当被检测物体进入感应距离时,接收器可以收到反射光;当被检测物体离开后,接收器收不到反射光。当被检测物体的表面光亮或其反光率极高时,漫反射式光电开关是首选的检测模式。

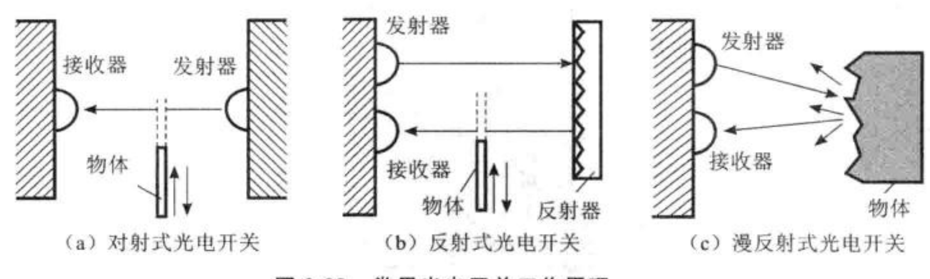


图 2-22 常用光电开关工作原理

2.5 接 触 器

接触器主要用于控制电动机、电热设备以及电焊机等接通或断开交、直流主电路,以实现远距离自动控制。它具有欠压自动释放保护功能,广泛应用于电气拖动和自动控制系统中。

2.5.1 接触器的分类

接触器种类很多,根据不同的分类原则,有不同的分类方法。

按驱动触头系统的动力不同,分为电磁式接触器、气动式接触器和液压式接触器;按通过主触头的电流种类,分为交流接触器和直流接触器。直流接触器有单极和双极两种,用于直流电动机等直流设备电源的通断;交流接触器有三极、四极和五极三种,用于交流电动机等交流设备电源的通断。

2.5.2 交流接触器的结构

电磁式交流接触器主要由电磁系统、触头系统、灭弧装置和其他辅助部件等组成,其结构如图 2-23 所示。

1. 电磁机构

电磁机构由线圈、动铁芯(衔铁)和静铁芯组成。其作用是利用电磁线圈通

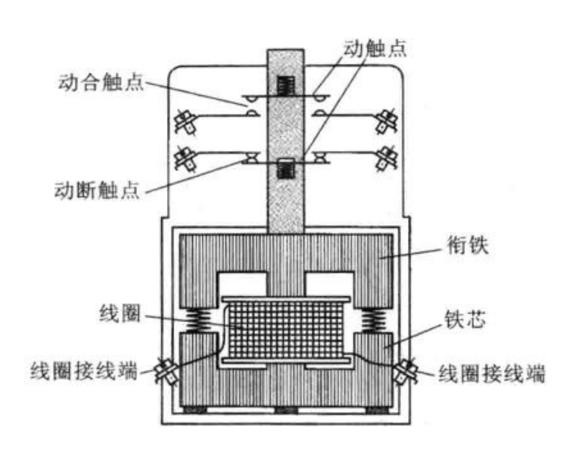


图 2-23　交流接触器结构示意图

电或断电，使衔铁吸合或释放，从而带动动触头与静触头闭合或分断。

为了减少在铁芯中产生的涡流及磁滞损耗，避免铁芯过热，交流接触器的铁芯和衔铁一般用 E 形硅钢片叠压铆成。尽管如此，铁芯仍然是交流接触器发热的主要部件。为增加铁芯的散热面积，又避免线圈与铁芯直接接触而受热烧毁，交流接触器的线圈一般做成粗而短的圆筒形，并且绕在绝缘骨架上，使铁芯与线圈之间有一定间隙。另外，铁芯上装有短路环，又称减振环。其作用是减少交流接触器得电吸合时产生的振动和噪声。短路环一般用铜或镍铬合金等材料制成。

2. 触头系统

接触器的触头用来接通和断开电路。触头系统包括主触头和辅助触头，常采用双断口桥式触头。主触头用于通断主电路，通常有 3～5 对常开主触点；辅助触头的接触面积小，通过电流小，一般用于控制电路，通常有 2 对常开辅助触点和 2 对常闭辅助触点。

常开触点和常闭触点是联动的。当线圈通电时，常闭触点先断开，常开触点随后闭合；而线圈断电时，常开触点首先复位断开，随后常闭触点复位闭合，虽然这两类触点状态改变的时间差很短，但对分析电路的控制原理很重要。

3. 灭弧装置

容量在 10 A 以上的接触器都有灭弧装置。对于小容量的接触器，往往采用双断头或电动力灭弧；对于大容量的接触器，常采用纵缝灭弧罩或栅片灭弧结构。

4．辅助部件

交流接触器的辅助部件主要有反作用弹簧、缓冲弹簧、触头压力弹簧、传动机构、底座及接线柱等。

2.5.3 交流接触器的工作原理

当电磁线圈通电后，线圈电流产生磁场，使静铁芯产生电磁吸力吸合衔铁，并带动触头动作，使常闭触头断开，常开触头闭合。当电磁线圈断电时，电磁力消失，衔铁在释放弹簧的作用下释放，使触头复位，即常开触点断开，常闭触点闭合。接触器的电气符号如图 2-24 所示。

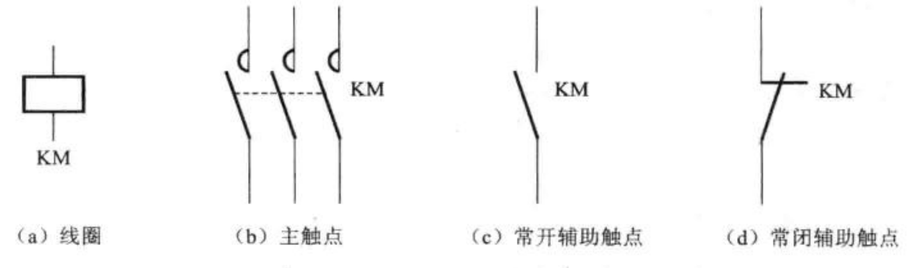


图 2-24 交流接触器电气符号

交流接触器的工作原理如图 2-25 所示。

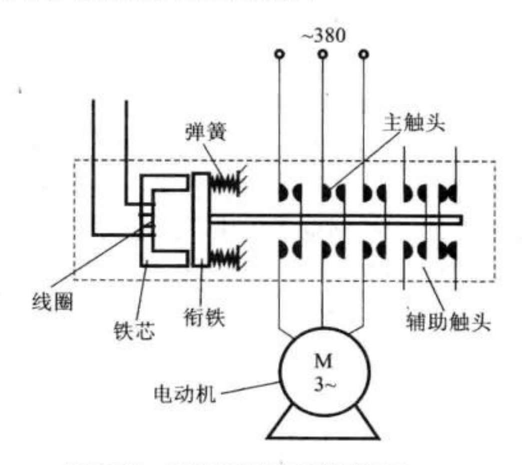


图 2-25 交流接触器工作原理图

2.5.4 直流接触器

直流接触器主要用于远距离接通和分断直流主电路，广泛用于直流电动机的起动、停止以及正反转等，还可用于直流电磁操作机构的合闸线圈或频繁接通和断开电磁阀、离合器的直流线圈等。

直流接触器的结构和工作原理与交流接触器基本相同，主要由电磁机构、触点系统和灭弧装置三大部分组成。触点系统提供了主触点和辅助触点。交流接触器的主触点流过的是交流电，而直流接触器主触点流过的是直流电。直流接触器的线圈中多通入的是直流电，正常工作时，铁芯中不会产生涡流，铁芯不发热，没有铁损耗，因此铁芯可用整块铸铁或铸钢制成。直流接触器线圈匝数较多，为了使线圈散热良好，通常将线圈绕制成长而薄的圆筒状。主触点一般做成单极或双极，由于触点接通或断开的电流较大，所以采用滚动接触的指形触点。辅助触点的通断电流较小，常采用点接触的双断点桥式触点。

2.5.5 永磁式交流接触器

永磁式交流接触器的诞生，是国内外交流接触器技术的一次革命，它有着很高的性价比，现已逐步替代传统的电磁式交流接触器。永磁式交流接触器由三部分组成，即外壳、磁铁以及触头灭弧系统。

永磁式交流接触器是利用磁极同性相斥、异性相吸的原理，用永磁驱动机构取代传统的电磁铁驱动机构而形成的一种微功耗接触器。安装在接触器联动机构上极性固定不变的永磁铁，与固化在接触器底座上的可变极性软磁铁相互作用，从而达到吸合、保持与释放的目的。软磁铁的可变极性是通过与其固化在一起的电子模块产生十几到二十几毫秒的正反向脉冲电流，而使其产生不同的极性。根据现场需要，用控制电子模块来控制设定的释放电压值，也可延迟一段时间再发出反向脉冲电流，以达到低电压延时释放或断电延时释放的目的，使其控制的电动机免受电网晃电而跳停，从而保持生产系统的稳定。

与传统的电磁式交流接触器相比，它具有如下特点。

（1）防电网电压波动干扰。电网电压波动时，永磁式交流接触器丝毫不受影响，而电磁式交流接触器主触头抖动严重，线圈电流增大。

（2）动作速度。永磁式交流接触器动作快，一般只需 0.12～0.15 s；电磁式交流接触器动作慢，一般需要 0.32～0.37 s。

（3）节能。传统接触器的合闸保持是靠合闸线圈通电产生电磁力来克服分闸弹簧实现的，其合闸保持是必须靠线圈持续不断的通电来维持的，这个电流

从数十到数千毫安；而永磁交流接触器合闸保持依靠的是永磁力，不需要线圈通过电流产生电磁力来进行合闸保持，其电子模块的工作电流只有0.8～1.5 mA。所以永磁式交流接触器耗能小，节电率大于99%；而电磁式交流接触器耗能大。

(4) 噪声。永磁式交流接触器十分安静，无交流噪声；电磁式交流接触器在发生电压不稳、铁芯吸合不正、短路环断开、端面有异物等状况时都会产生100 Hz的交流噪声。

(5) 温升。永磁式交流接触器没有线圈，无温升；电磁式交流接触器电磁线圈发热，铁芯卡住或电压低时易烧毁。

(6) 主触头。永磁式交流接触器动作干净不打颤，合分明确，无烧蚀；电磁式交流接触器打颤严重，主触头易烧蚀，易出现熔焊现象。

2.6 继 电 器

继电器主要用于控制电路和辅助电路中作信号转换用。当感应元件中的输入量(如电流、电压、温度、压力等)变化到某值时继电器动作，执行元件便接通或断开控制回路。

继电器的种类很多。按照动作原理分为电磁式继电器、感应式继电器、电动式继电器、电子式继电器、机械式继电器、热继电器等；按用途分为控制继电器和保护继电器；按输入量分为电流继电器、电压继电器、时间继电器、热继电器、速度继电器等。按照动作时间分为瞬时继电器和延时继电器。

2.6.1 电磁式继电器

电磁式继电器主要包括电流继电器、电压继电器和中间继电器。

电磁式继电器的结构、工作原理与电磁式接触器基本相似，由电磁系统、触头系统等组成。由于继电器用于控制和辅助电路，流过触头的电流小，所以不需要灭弧装置。图2-26为一种典型电磁式继电器的结构示意图。

1. 电流继电器

电流继电器的线圈串接在被测量的电路中，以反映电路电流的变化。为了不影响电路正常工作，电流继电器线圈匝数少、导线粗、线圈阻抗小。

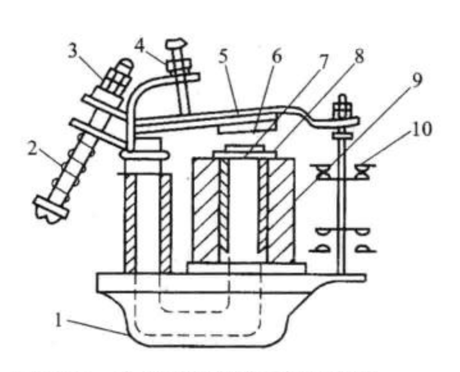


图 2-26　电磁式继电器结构示意图

1—底座；2—反力弹簧；3、4—调节弹簧；5—非磁性垫片；
6—衔铁；7—铁芯；8—极靴；9—电磁线圈；10—触头

电流继电器有欠电流继电器和过电流继电器两类。欠电流继电器的吸引电流为线圈额定电流的 30%～65%，释放电流为额定电流的 10%～20%。因此，在电路正常工作时，衔铁是吸合的，只有当电流降低到某一整定值时，继电器才释放，触点复位。过电流继电器在电路正常工作时不动作，当电流超过某一整定值时，触点才动作，整定范围通常为额定电流的 1.1～4 倍。

2. 电压继电器

电压继电器的结构与电流继电器相似，不同的是电压继电器线圈是并联在被测量电路中的，所以匝数多、导线细、阻抗大。

电压继电器是一种按电压值动作的继电器。电压继电器按动作电压值的不同，有过电压继电器、欠电压继电器和零电压继电器之分。过电压继电器在电压为额定电压的 110%～115%以上时动作；欠电压继电器在电压为额定电压的 40%～70%时动作。

3. 中间继电器

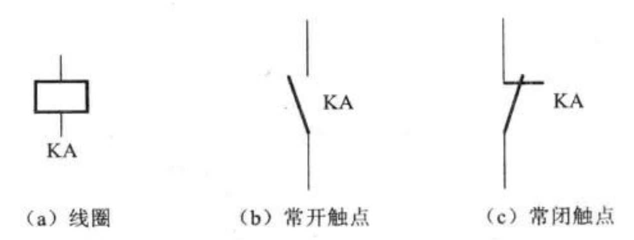
中间继电器是最常用的继电器之一。中间继电器在控制电路中主要起逻辑变换、状态记忆、触点数量扩展等作用。

中间继电器实质上是一种电压继电器，它的触点对数较多、触点额定电流一般为 5～10 A。中间继电器不能用于大容量电路的通断，但可用于小电流主电路，如冷却泵等小容量电动机的主电路。

中间继电器的电气符号如图 2-27 所示。

2.6.2　时间继电器

时间继电器是一种按照所需的时间间隔，实现触点延时接通或断开的控制



(a) 线圈 (b) 常开触点 (c) 常闭触点

图 2-27 中间继电器电气符号

电器。按照触点的动作时序，通常分为通电延时时间继电器和断电延时时间继电器。按其动作原理与构造不同，可分为电磁式、空气阻尼式、电动式和电子式等类型。目前，最常用的是电子式时间继电器，下面以电子式时间继电器为例，阐述其基本原理。

电子式时间继电器又称半导体时间继电器。它是利用半导体元件做成的，它具有适用范围广、延时精度高、调节方便、寿命长等一系列的优点，被广泛地应用于自动控制系统中。按照构成，电子式时间继电器可分为晶体管时间继电器和数字式时间继电器两大类；按照延时电路的输出形式可分为有触点型和无触点型时间继电器。

电子式时间继电器的延时(计时)有两种方式，一是采用阻容充电原理经电阻限流在一定时间(设置时间)才使电容充满电，三极管输出高电平驱动继电器动作，这种也称为晶体管式时间继电器；另一种是采用振荡器输出秒脉冲供计数电路计时，当计数到设置时间就输出高电平驱动继电器动作，这种也称为数字式时间继电器。

图 2-28 给出了 JS20 系列晶体管时间继电器的电路原理图。当电源接通后，经 VD1～VD4 二极管桥式整流，电容器 C_1 滤波及稳压管稳压的直流电压，经电位器 RP1 和电阻 R_2 向电容 C_2 充电，电容器 C_2 两端电压按指数规律上升。当此电压大于单结晶体管 VU 的导通电位时，VU 导通，输出脉冲使晶闸管 VTH 导通，继电器 KA 线圈得电，触头动作接通或分断外电路。调节 RP1，可调节时间。中间继电器 KA 线圈得电后，其常开触点闭合，将电容 C_2 短路，使其迅速放电，为下次充电延时做好准备。

晶体管式时间继电器具有延时范围广、体积小、精度高、调节方便及寿命长的优点，主要用于中等延时(0.05～1 h)场合。

数字式时间继电器是采用数字脉冲计数电路，由脉冲频率决定延时长短，定时精度高，主要用于延时时间较长的场合。图 2-29 为 SSJ8 高精度数字式时间继电器的构成原理。该数字式时间继电器采用 CMOS 集成电路，利用分频技

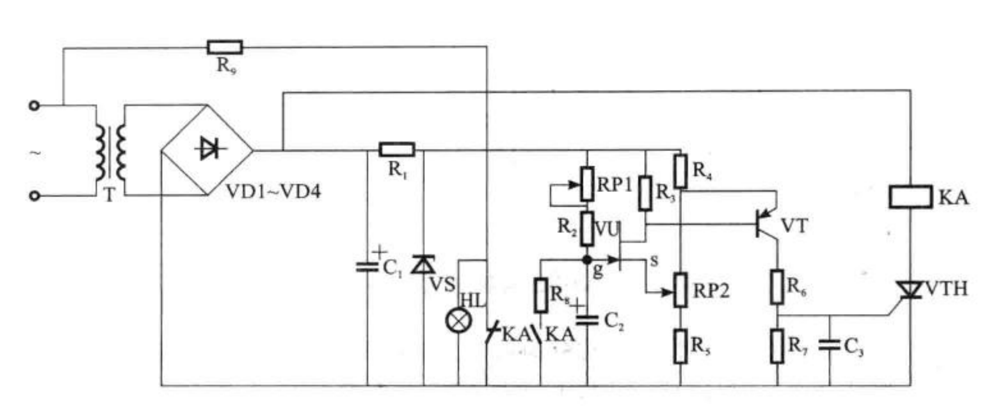


图 2-28　JS20 系列晶体管时间继电器电路原理

术原理实现延时。标准时钟脉冲由石英晶体振荡器产生。继电器一旦施加额定电压，内部瞬动继电器动作输出，同时使晶体起振，产生时钟脉冲，经分频后由计数器计数，当所计数脉冲达到延时整定值时，触发器翻转，驱动执行继电器动作输出。

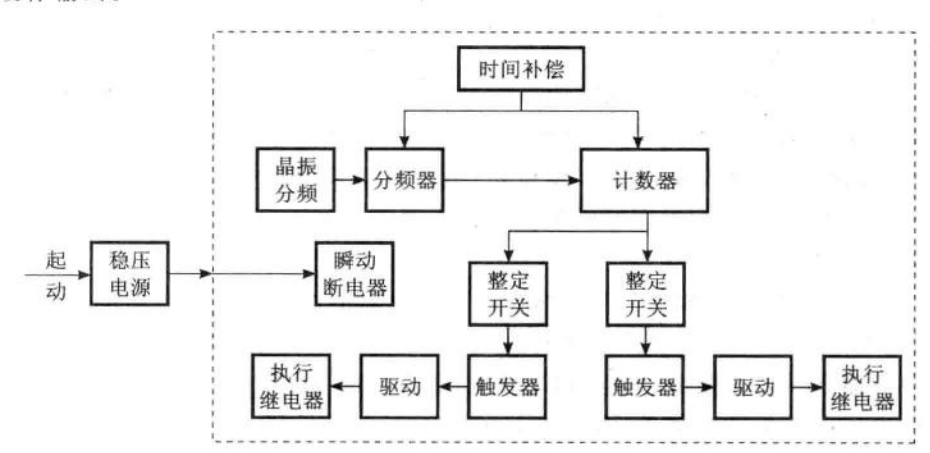


图 2-29　SSJ8 型高精度数字式时间继电器结构原理

时间继电器的电气符号如图 2-30 所示。

2.6.3　速度继电器

速度继电器是根据电磁感应原理制成的，用于转速的检测。在三相笼型感应电动机的反接制动控制电路中，使用速度继电器可以防止反向起动。图 2-31

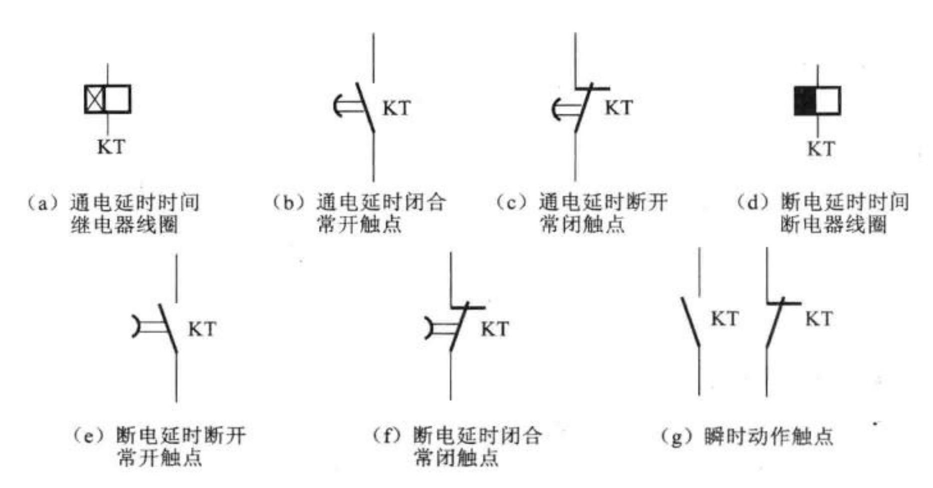


图 2-30 时间继电器电气符号

所示为速度继电器的结构示意图。

由图 2-31 可知，速度继电器主要由转子、圆环(笼型空心绕组)和触头三部分组成。转子由一块永久磁铁制成，与电动机同轴相连，用以接受转动信号。当转子(磁铁)旋转时，笼型绕组切割转子磁场产生感应电动势，形成环内电流。此电流与磁铁磁场相互作用，产生电磁转矩，圆环在此力矩的作用下驱动摆锤。当电动机转速超过某一数值时，此力矩能克服弹簧力而顺转子转动的方向摆动，并拨动触头改变其断合状态。当电动机转速低于某一数值时，定子产生的转矩减小，触点在反力弹簧作用下复位。调节反力系统的反作用力，可以调节触头动作所需转子的转速。

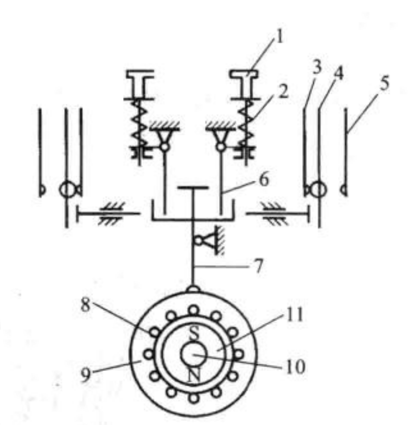


图 2-31 速度继电器结构示意图

1—螺钉;2—反力弹簧;3—常闭触头;4—动触头;5—常开触头;6—返回杠杆;7—摆杆;8—定子导体;9—定子圆环;10—转轴;11—转子

速度继电器有两对常开、常闭触点，分别对应于被控电动机的正、反转运行。一般情况下，在起动阶段，电动机的转速上升到 120 r/min 以上时，速度继电器的触点动作;在停止阶段，电动机的转速下降到 100 r/min 以下时，速度继电器的触点复位。

图 2-32 给出了速度继电器的电气符号。

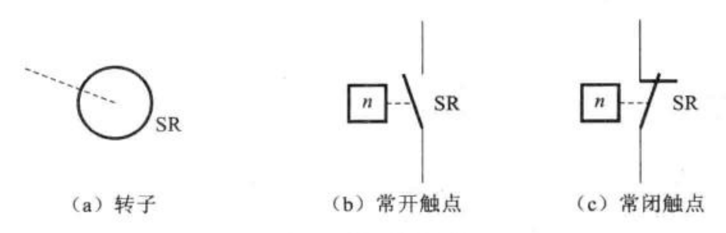


图 2-32　速度继电器电气符号

2.6.4　热继电器

电动机在实际运行中，如拖动生产机械进行工作的过程中，若机械出现不正常的情况或电路异常使电动机遇到过载，则电动机转速下降，绕组中的电流增大，使电动机的绕组温度升高。若过载电流不大且过载的时间较短，电动机绕组不超过允许温升，这种过载是允许的。但若过载时间长，过载电流大，电动机绕组的温升就会超过允许值，使电动机绕组老化，缩短电动机的使用寿命，严重时甚至会使电动机绕组烧毁。所以，这种过载是电动机不能承受的。热继电器就是利用电流的热效应原理，在出现电动机不能承受的过载时切断电动机电路，为电动机提供过载保护。

热继电器的结构如图 2-33 所示。

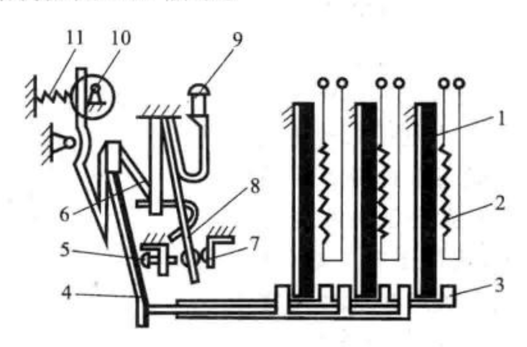


图 2-33　热继电器结构

1—主双金属片；2—电阻丝；3—导板；4—补偿双金属片；5—静触头(复位调节螺钉)；6—推杆；7—静触头；8—人字形拨杆；9—复位按钮；10—电流调节凸轮；11—弹簧

热继电器主要由热元件、双金属片、触头及一套传动和调整机构组成。双金属片 1 是由两种不同热膨胀系数的金属片，通过机械碾压在一起制成，一端固定，另一端为自由端。当双金属片的温度升高产生热效应时，使得双金属片

向热膨胀系数小的一侧弯曲。

使用热继电器对电动机进行过载保护时,将热元件与电动机的定子绕组串联,将热继电器的常闭触点串联在接触器电磁线圈的控制电路中。通过调节整定电流之调节凸轮 10,改变人字形拨杆 8 与推杆 6 的距离,从而达到热继电器跳闸所需的条件。

当电动机正常工作时,通过热元件的电流即为电动机的额定电流,热元件发热,双金属片 1 受热后弯曲,使推杆 6 刚好与人字形拨杆 8 接触,但又不会推动人字形拨杆 8。此时,静触头 7 和人字形拨杆 8 下方的触头构成的常闭触点处于闭合状态,该常闭触点所控制的交流接触器保持吸合,电动机正常运行。

若电动机出现过载情况,电动机绕组中电流增大,通过热元件中的电流也增大,使双金属片 1 温度升得更高,弯曲程度加大,推动人字形拨杆 8,人字形拨杆 8 推动常闭触点,使常闭触点断开,从而断开接触器的线圈电路,接触器释放,切断电动机的电源,使电动机停车。

补偿双金属片 4 是为了在规定范围内补偿环境温度对热继电器的影响。如果环境温度升高,使得双金属片 1 向左弯曲,同时也会使补偿双金属片 4 向左弯曲,这样导板 3 与补偿双金属片 4 之间的相对距离保持不变,反之亦然。有时也可以采用欠补偿,即温度升高时,补偿双金属片 4 的弯曲程度小于双金属片 1,减小导板 3 与补偿双金属片 4 之间的相对距离,从而使热继电器在高温下动作较快,以更好地保护电动机。

普通热继电器用于电动机等主电路的过载保护,某些型号的热继电器还具有断相保护功能,即由于某种原因致使电动机的一相绕组断电时,热继电器动作。因此,热继电器主要用于电动机的过载、断相及电流不平衡的保护。

热继电器由于热惯性,当电路短路时不能立即动作,因此不能作短路保护。同理,在电动机不频繁起动或短时过载时,需调节整定电流值,以使热继电器不会动作,这可避免电动机不必要的停车。

热继电器动作电流的整定主要根据电动机的额定电流来确定。热继电器的整定电流是指它长期通过发热元件而不致使热继电器动作的最大电流,超过此值则动作。整定电流的大小可通过整定电流调节凸轮 10 来实现,该调节旋钮为一个偏心轮,旋转调节旋钮可以改变传动杆和动触点之间的传动距离,距离越长动作电流就越大,反之动作电流就越小。

一般热继电器上的复位按钮可以转换自动复位和手动复位。如果设置在手动复位,在保护后按一下复位按钮即可复位。对于大电流过载的,一般也需要过一段时间才能使用手动复位。如果设置在自动复位,则需要待双金属片自然冷却后恢复初始状态。自动复位时间一般不超过 5 min,手动复位时间一般

不超过 2 min。

热继电器的电气符号如图 2-34 所示。

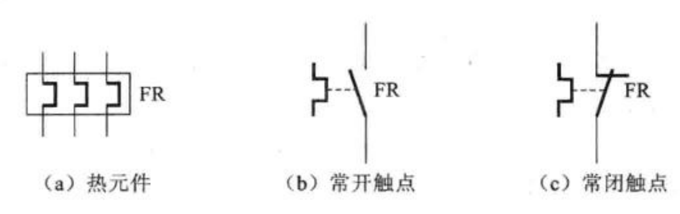


图 2-34 热继电器电气符号

2.6.5 熔断器

熔断器在电路中主要起短路保护作用。它是一种简单而有效的保护电器。

熔断器的熔体串接于被保护的电路中，熔断器以熔体自身产生的热量使熔体熔断，从而自动切断电路，实现短路保护及严重过载保护。熔断器具有结构简单、体积小、质量小、使用维护方便、价格低廉、分断能力较高、限流能力良好等优点，因此在电路中得到广泛应用。

熔断器及熔体外形示意图如图2-35所示。

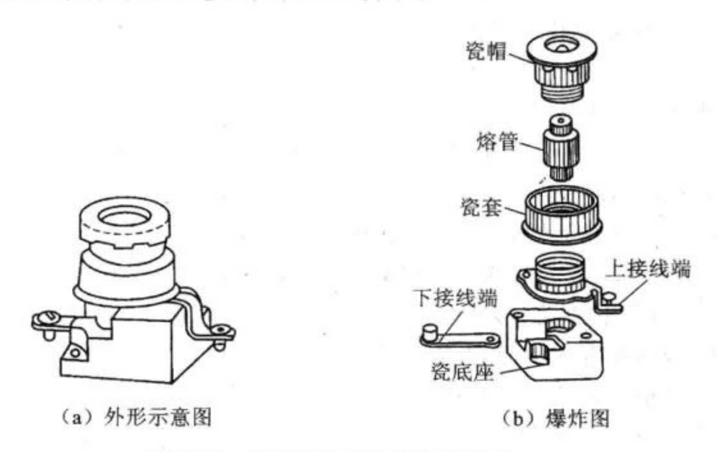


图 2-35 熔断器及熔体外形示意图

熔断器包括熔体和熔体座等部分。熔体的热量与通过熔体电流的平方及持续通电时间成正比，当电路短路时，电流很大，熔体急剧升温，立即熔断。当电路中电流值等于熔体额定电流时，熔体不会熔断，这种特性称为熔断器的反时限保护特性或安秒特性。

熔断器的电气符号如图 2-36 所示。



图 2-36 熔断器电气符号

2.6.6 电动机保护器

热继电器是 20 世纪 50 年代初引进前苏联技术开发的，它是一种金属片机械式电动机过载保护器，热继电器以其反时限保护性能好、体积小、结构简单以及成本低等优点得到了广泛应用。但由于存在保护功能少、电动机频繁起停时不能使用、过载保护后不能立即再次使用等缺点，热继电器正逐渐被电动机保护器取代。电动机保护器能对电动机进行过载、断相、短路、三相不平衡、堵转、过压、欠压、漏电等故障进行报警和保护，它提升了电动机的控制功能和保护效果。电动机保护器也称为电动机综合保护器或智能保护器。图 2-37 所示为一种电动机综合保护器的外观示意图。

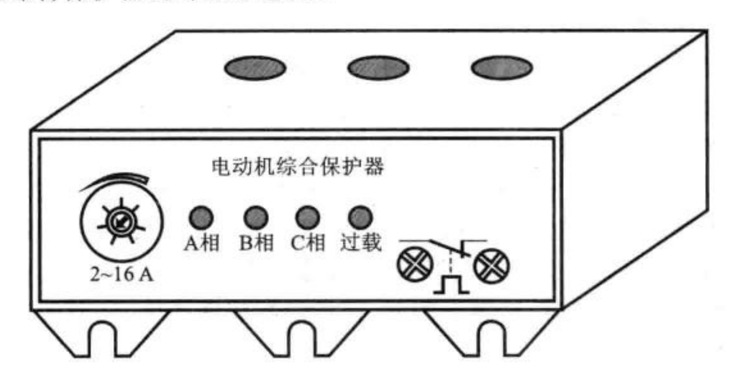


图 2-37 电动机综合保护器外形示意图

电动机保护器一般具有过载、断相和短路的基本保护功能，其典型电路结构如图2-38所示。LH1～LH3 为三个电流互感器采样电动机三相绕组的电流信号。

（1）过载、短路故障信号的采样。电动机运行中的过载和短路故障，体现在流经电动机绕组异常增大的电流值上，将电流互感器采样的电流信号与电流基准信号相比较，以判断主电路是否处于过载或短路故障状态，一般将大于电动机 8 倍额定电流的视为短路电流。

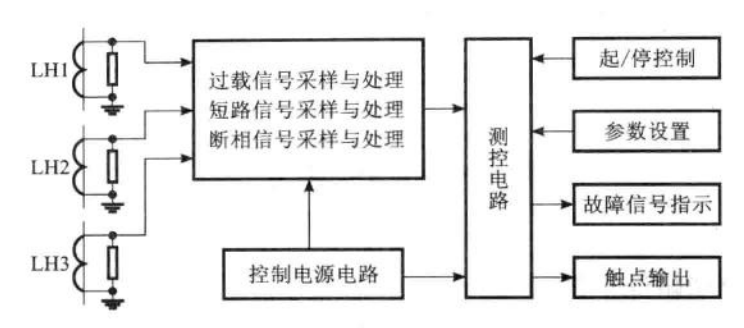


图 2-38　电动机保护器典型电路结构

(2) 断相故障信号的采样。电动机的断相故障表现为电源缺相、电动机绕组接线电缆断路、电动机绕组断路三种不同断相现象。

在电动机起动前断相，会造成起动困难或无法起动、起动声音异常、无保护时电动机因堵转而极易烧毁；在电动机运行中断相，轻载时尚能运转，但运行电流严重不平衡，出现过流运行情况，重载时易发生堵转而损坏。电动机出现堵转时，其堵转电流可能达到额定电流的 5～8 倍，在运行中出现 5 倍以上额定电流时，被视为电动机堵转故障。

一般对断相运行的判断，不是着眼于电流信号幅度的大小，而是着重于三相电流信号的有无，比较三相电流信号的有无，可得到断相故障信号。采取相应的技术措施，还能对三相电流不平衡做出判断。

(3) 电动机保护器一般具有起/停控制功能，可以接起/停控制按钮；有过载的整定电流等参数设置功能；有过载、短路及断相故障的 LED 灯指示，或使用液晶屏进行参数及故障显示；保护器的常闭型输出触点串接于电动机的控制电路，当电动机发生故障时，该触点断开，使接触器线圈断电，从而断开电动机的三相电源。

思考与练习

1. 在电动机的控制线路中，熔断器和热继电器能否相互代替？为什么？

2. 线圈电压为 220 V 的交流接触器，误接入 220 V 直流电源上；或线圈电压为 220 V 直流接触器，误接入 220 V 交流电源上，会产生什么后果？为什么？

3. 电动机的起动电流很大，起动时热继电器应不应该动作？为什么？

4. 自动空气开关有哪些脱扣装置？各起什么作用？

5. 简述交流接触器在电路中的作用、结构和工作原理。

6. 用一个万能转换开关测量三相电源的线电压，如图 2-39 所示，问在 1、2、3、4 位，电压表所测得的是什么电压？

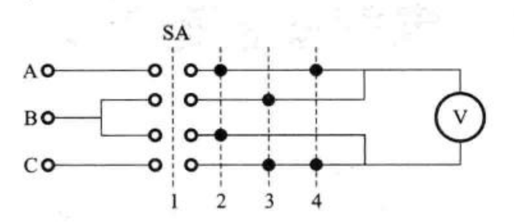


图 2-39 三相电压测量电路

7. 中间继电器与交流接触器有什么区别？什么情况下可用中间继电器代替交流接触器使用？

8. 什么是低压电器？

9. 行程开关的触头动作方式有哪几种？各有什么特点？

10. 试绘制通电延时时间继电器和断电延时时间继电器的电气符号，并说明触点的动作原理。

第3章 电气图基础知识

为了说明生产机械电气控制系统的结构及原理等设计意图，便于电气系统的安装、调试、使用和维修，将电气控制系统中各电器元件及其连接线路用一定的图形表达出来，这就是电气控制系统图。目前，我国已经颁布了适用所有电气简图用图形符号的 GB/T 4728—2005～2008、所有电气设备用图形符号的 GB/T 5465—2008～2009 以及文字符号代码的 GB/T 20939—2007 等最新国家标准。

3.1 电气图中的图形符号和文字符号

3.1.1 电气图中的图形符号

图形符号是以图形或图像为主要特征，表示一个设备或概念的图形、标记或字符。图形符号含有符号要素、一般符号和限定符号。符号要素是一种具有确定意义的简单图形，必须同其他图形结合才构成一个设备或概念的完整符号；一般符号是用以表示一类产品和此类产品特征的一种简单的符号；限定符号是一种加在其他符号上提供附加信息的符号，它不能单独使用。表 3-1 给出了常见的基本图形符号。

3.1.2 电气图中的文字符号

文字符号用于电气技术领域中技术文件的编制，也可以标注在电气设备、装置和元器件上或近旁，以表示电气设备、装置和元器件的名称、功能、状态和特性。目前文字符号的国家标准为 GB/T 20939—2007，但由于该标准的两位

文字符号不能界定低压电器，尚需要进一步细分，故本书依旧使用GB 7159—1987《电气技术中的文字符号制订通则》规定的电气元件文字符号。

表 3-1 常见基本图形符号

图形符号		名称或含义	图形符号		名称或含义
限定符号		接触器功能	符号要素		按动操作，一般符号
		位置开关功能			自动复位的按动操作
		隔离开关功能			拉拔操作
		负荷隔离开关			旋转操作
		断路器功能			蘑菇头式应急操作
		热效应			断电延时动作
		电磁效应			通电延时动作
		自动释放功能			接近效应操作
一般符号		常开（动合）触点	一般符号		常闭（动断）触点
		线圈			熔断器

3.2 电气控制原理图的绘制方法

为了便于对生产机械电气控制系统进行设计、研究分析、安装调试、使用和维修，需要对电气控制系统中各元件及其相互连接用国家标准规定的图形和文字符号表示出来，这就是电气控制系统图。



常见的电气系统图包括电气控制原理图、电气设备位置图和电气设备接线图(电气安装接线图)三种。

本节仅阐述电气控制原理图的相关知识。电气设备位置图和电气设备接线图在电气控制系统设计部分讲解。

电气控制原理图主要用来表达电气控制系统的组成和连接关系,用来分析控制系统的工作原理。

根据简单清晰的原则,电气控制原理图采用电器元件展开的形式绘制,绘制原则由国家标准 GB/T 6988.1—2008、GB/T 6988.2—1997 给出,可归纳简述如下。

(1) 电气控制原理图按所规定的图形符号、文字符号进行绘制。

原理图中,所有电动机、电器等元件都应采用国家统一规定的图形符号和文字符号来表示。属于同一电器的线圈和触点,要用同一文字符号表示。当使用相同类型电器时,可在文字符号后面加注阿拉伯数字来区分。

(2) 电气控制原理图一般分为主电路、控制电路、信号指示及照明电路,三种电路需要分开绘制。

主电路也称为动力电路或拖动电路,是从电源到电动机大电流通过的路径。

电气控制原理图中的电源部分是为整个电气系统提供电源,一般由低压隔离器和主熔断器或断路器组成。电源线需水平绘制,三相交流电源相序 L1、L2、L3 由上而下排列;直流电源线则正端在上、负端在下画出。主电路要垂直于电源线绘制,布局在整个原理图的左侧,一般由熔断器、接触器主触点、热继电器的热元件和电动机等组成。

控制电路、信号指示及照明电路由控制变压器、接触器和继电器的线圈和触点、按钮、照明灯、信号灯等电器元件组成,其流过的电流比较小。其中,控制电路是指控制主电路工作的电路,信号指示电路是指显示主电路工作状态的信号灯电路,照明电路是指实现机械设备局部照明的电路。绘制电气控制原理图时,控制电路、信号指示及照明电路要依次垂直画在上下两水平电源线之间,且布置在主电路的右侧。

(3) 原理图中,同一电器的各部件不按它们的实际位置画在一起,而是按其在线路中所起作用分别画在不同电路中,但它们的动作却是相互关联的,必须标以相同的文字符号。

(4) 原理图中,所有电器的触头位置都按电器未通电或未受外力作用时的常态位置画出。

(5) 电器的线圈、信号灯等被控(耗能)元件应直接与下水平电源线连接,而

控制触点应连接在上水平电源线与被控元件之间。

(6) 如图 3-1 所示，整个原理图分为三个部分。上面部分为功能区，用文字简要表达下面对应电路的功能；中间部分为主电路、控制电路、信号指示及照明电路；下面部分为用阿拉伯数字表示的图区，每个图区对应上面的电路支路。

(7) 接触器线圈文字下方有两条竖线分成左中右三栏，继电器线圈文字下方有一条竖线分成左右两栏，此触头表用来说明线圈和触头的从属关系。对于接触器来说，从左到右，依次表示主触点、辅助常开触点和辅助常闭触点所在的图区；对于继电器来说，从左到右，依次表示常开触点和常闭触点所在的图区。

例如图 3-1 中，KM1 下方触点表的含义为：在 2 区有 KM1 的 3 个主触点，7 和 9 区各有 KM1 的 1 个辅助常开触点，右栏的两个“×”表示该原理图没有使用 KM1 的辅助常闭触点。KA 下方触点表的含义为：在 3 区有 KA 的 3 个常开触点，该原理图没有使用 KA 的常闭触点。

(8) 原理图中，对有直接电联系的交叉导线连接点，要用小黑点表示，无直接电联系的导线交叉点则不画小黑圆点。

3.3 电气控制的逻辑表达式

3.3.1 开关电器的逻辑表示

在电气控制原理图中，开关元件只有受激和未受激，线圈只有通电和断电，触点只有接通和断开两个状态，因而元件、线圈和触点可以用只有“1”和“0”两个值的逻辑变量表示，电路的工作过程可以用逻辑函数进行描述。

为了便于用逻辑代数描述电路，对电气元件逻辑表达式作如下规定：

(1) 元件、线圈及其常开触点用文字符号本身表示，如 KM 表示接触器，也可以表示接触器的线圈、常开触点；SB 表示按钮，也可表示按钮的常开触点。常闭触点用$\overline{KM}$、$\overline{SB}$和$\overline{KA}$等表示。

(2) 触点的接通状态为“1”，断开状态为“0”。

(3) 线圈通电状态为“1”，断电状态为“0”。

(4) 元件受激状态为“1”，未受激状态为“0”。

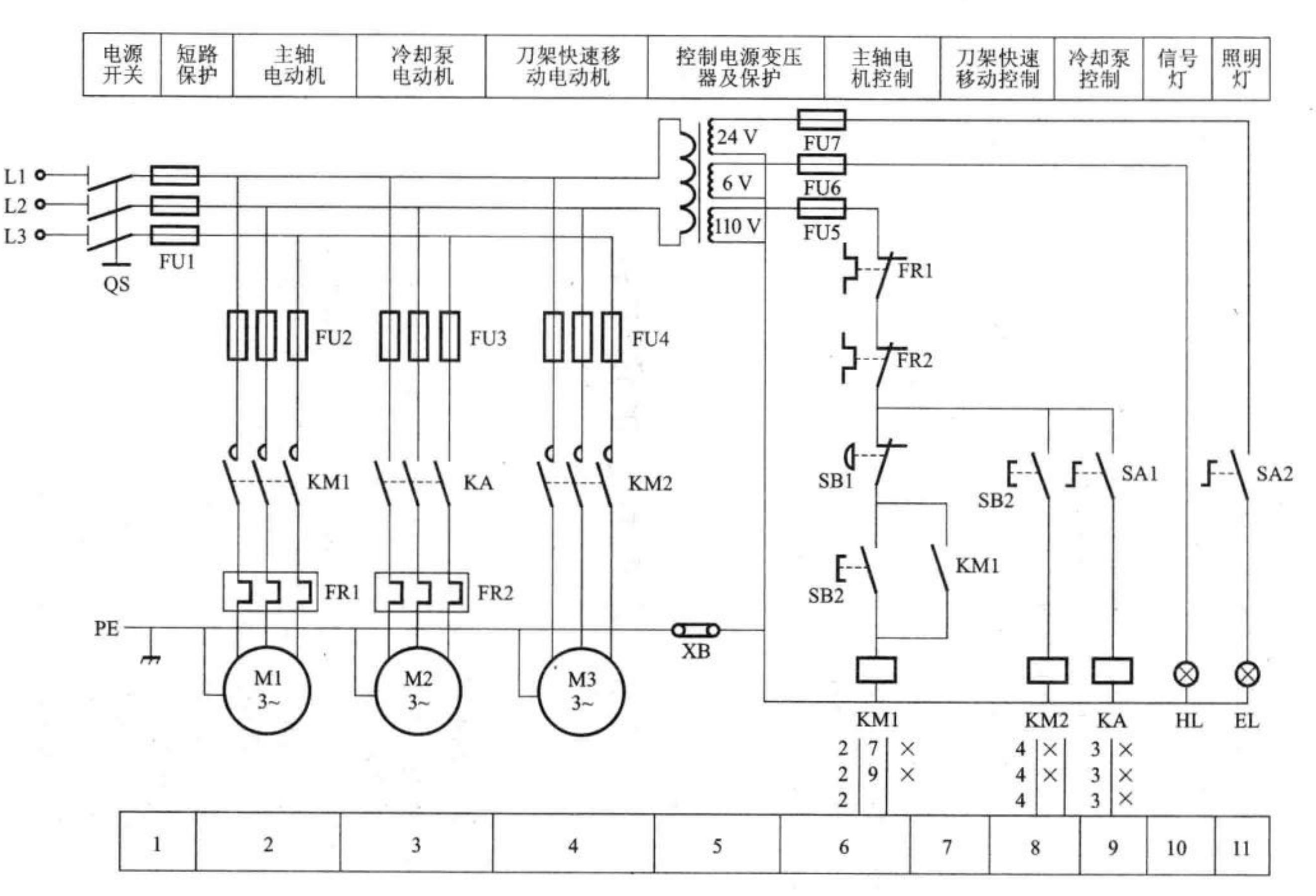

电源开关
短路保护
主轴电动机
冷却泵电动机
刀架快速移动电动机
控制电源变压器及保护
主轴电机控制
刀架快速移动控制
冷却泵控制
信号灯
照明灯
L1
L2
L3
QS
FU1
FU2
FU3
FU4
KM1
KA
KM2
FR1
FR2
PE
M1 3~
M2 3~
M3 3~
XB
24 V
6 V
110 V
FU7
FU6
FU5
FR1
FR2
SB1
SB2
KM1
SB2
SA1
SA2
KM1
KM2
KA
HL
EL
2 7 ×
2 9 ×
2
4 ×
4 ×
4
3 ×
3 ×
3 ×
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11

图3-1 电气控制原理

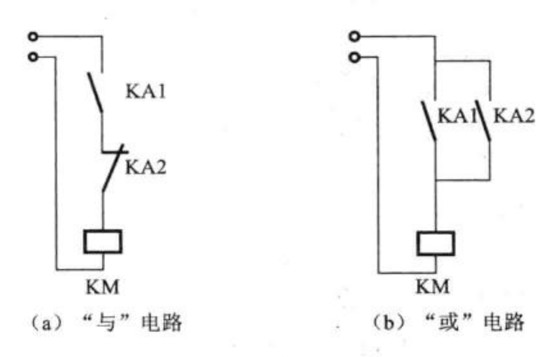
例如，KA=1，可以理解为继电器 KA 的线圈通电，也可以理解为 KA 常开触点接通；$\overline{KM}=1$，表示接触器 KM 的常闭触点接通。SB=1 表示按钮受激，也可以理解为其常开触点接通。

3.3.2 逻辑运算法则

1. 逻辑“与”电路

如图 3-2(a)所示，触点串联实现逻辑“与”电路，相当于逻辑函数中的“与”运算，用运算符号“×”表示。图 3-2(a)电路的逻辑表达式为

$$KM = KA1 \times \overline{KA2} \tag{3-1}$$



(a) “与”电路　(b) “或”电路

图 3-2　逻辑电路

2. 逻辑“或”电路

如图 3-2(b)所示，触点并联实现逻辑“或”电路，相当于逻辑函数中的“或”运算，用运算符号“+”表示。图 3-2(b)电路的逻辑表达式为

$$KM = KA1 + KA2 \tag{3-2}$$

3. 逻辑代数的基本公式

表 3-2 列出了一些逻辑代数运算的基本公式。

表 3-2　逻辑代数基本公式

0 定则	$0+A=A$	$0\times A=0$
1 定则	$1+A=1$	$1\times A=A$
互补定律	$A+\overline{A}=1$	$A\times\overline{A}=0$
同一定律	$A+A=A$	$A\times A=A$
反转定律	$\overline{\overline{A}}=A$	
交换律	$A+B=B+A$	$A\times B=B\times A$

续表

结合律	$(A+B)+C=A+(B+C)$	$(A\times B)\times C=A\times(B\times C)$
分配律	$A\times(B+C)=A\times B+A\times C$	
反演律	$\overline{A+B}=\overline{A}\times\overline{B}$	$\overline{A\times B}=\overline{A}+\overline{B}$

3.3.3 逻辑表达式

控制电路中，每个被控元件的通电和断电都由电器元件的触点组合来控制。电路中的触点通过并联或串联接线构成逻辑控制功能，每个被控元件均有自己的逻辑表达式。列写电路状态的逻辑表达式，围绕被控元件(线圈、灯等)进行。某起动控制电路如图 3-3 所示。

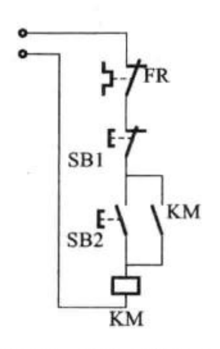


图 3-3 起动控制电路

图 3-3 中，只有一个被控元件，即 KM 线圈，为此，其逻辑表达式为

$$KM=\overline{FR}\times\overline{SB1}\times(SB2+KM) \tag{3-3}$$

3.3.4 电气控制原理图的化简

在电气设计时，往往最初所设计出来的电气原理图并非最简电路，这个时候可以通过电路等效化简获得最简电路。在化简时，先列出电路的逻辑表达式再进行化简。逻辑表达式的简化方法有两种：逻辑代数公式、数字电子技术中的卡诺图。

1. 用逻辑代数公式化简

图 3-4(a)所示控制电路的逻辑表达式为

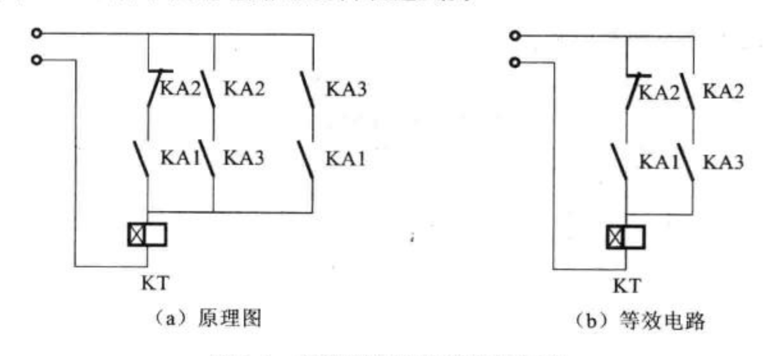


图 3-4 某控制电路及其等效电路

$$KT = \overline{KA2} \times KA1 + KA2 \times KA3 + KA3 \times KA1 \quad (3\text{-}4)$$

采用逻辑代数公式进行化简

$$\begin{aligned} KT &= \overline{KA2} \times KA1 + KA2 \times KA3 + KA3 \times KA1 \\ &= \overline{KA2} \times KA1 + KA2 \times KA3 + KA3 \times KA1 \times (KA2 + \overline{KA2}) \\ &= \overline{KA2} \times KA1 + KA3 \times KA1 \times \overline{KA2} + KA2 \times KA3 + KA3 \times KA1 \times KA2 \\ &= \overline{KA2} \times KA1 \times (1 + KA3) + KA2 \times KA3 \times (1 + KA1) \\ &= \overline{KA2} \times KA1 + KA2 \times KA3 \end{aligned} \quad (3\text{-}5)$$

根据式(3-5)，图 3-4(a)给出的原理图，可以简化为图 3-4(b)所示的电路。

2. 用卡诺图化简

所谓卡诺图就是与变量的最小项对应的按一定规则排列的方格图，每一小方格填入一个最小项，最早由美国工程师卡诺(Karnaugh)提出的。

根据式(3-4)，建立的卡诺图如图 3-5 所示。

利用卡诺图的化简原则，可得图 3-6。

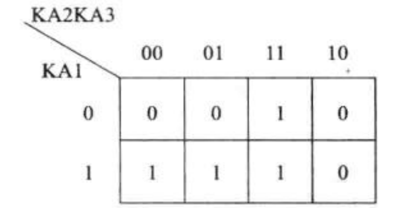


图 3-5　式(3-4)对应的卡诺图

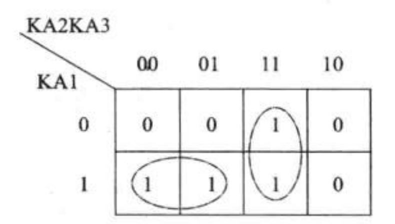


图 3-6　卡诺图化简

即化简为 $KT = \overline{KA2} \times KA1 + KA2 \times KA3$。

思考与练习

1. 电气控制原理图的绘制原则主要有哪些?
2. 写出图 3-7 电气图的逻辑表达式。
3. 写出图 3-8 电气图的逻辑表达式，并化简。

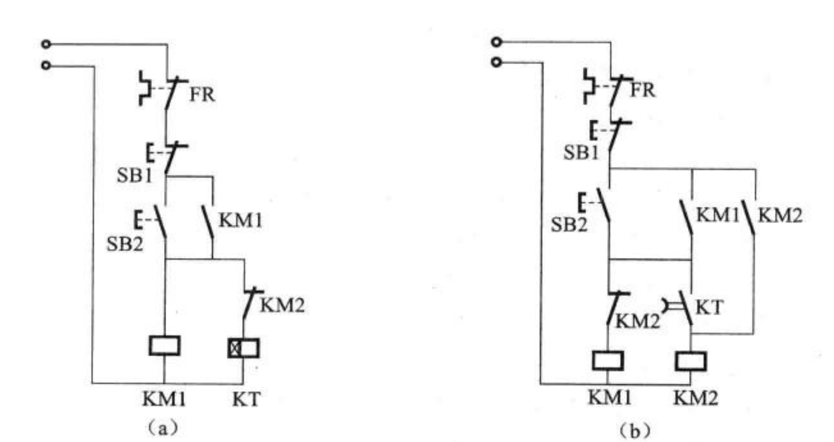


图 3-7　题 2 图

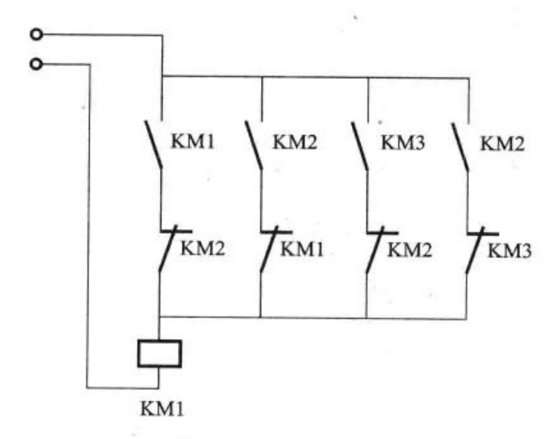


图 3-8　题 3 图

第4章 电气控制系统基本控制电路

在现代工农业等领域，广泛使用着各种生产机械。这些生产机械大多是由电动机提供动力拖动的，因而可以通过控制电动机来实现对生产机械的控制要求。继电器控制便是常用的一种实现电动机的起动、制动、正反向运行以及其他基本控制要求的方式。

由于各种生产机械的结构、原理及功能要求各不相同，其继电器控制电路也是千差万别。但从本质上，这些控制电路均是由一些具有一定控制功能的基本控制环节组成。熟练掌握这些基本控制环节对于整个电气控制线路的分析、设计和维修均具有重要意义。

4.1 三相笼型感应电动机的起动控制

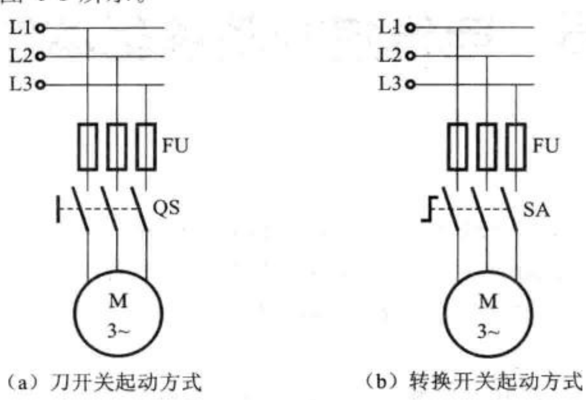
三相笼型感应电动机具有结构简单、坚固耐用、价格便宜、维修方便等优点，常作为生产设备的主要动力源而被广泛应用。据统计，在许多工矿企业中，笼型感应电动机的数量占电气拖动设备总台数的85%左右。笼型感应电动机有两种起动方法，即全压起动和降压起动。在允许的情况下，尽可能采用全压直接起动，既可以提高控制线路的可靠性，也可以减少电器的维修工作量。

4.1.1 全压起动

电动机由静止状态加速到稳定运行状态的过程称为电动机的起动。全压起动也称为直接起动，是将额定电压直接加在电动机定子绕组上进行起动。它具有起动设备简单、起动转矩大、起动电流大、起动时间短、成本低等特点，因此，全压起动是最好的起动方式。



对于小容量电动机，如冷却泵、小台钻、砂轮机和风扇等，可采用刀开关或转换开关，用手动方式直接控制其起动和停止，这是最简单的全压直接起动方法，其主电路如图 4-1 所示。



(a) 刀开关起动方式　　(b) 转换开关起动方式

图 4-1　直接手动全压起动电气原理

这种直接起动电路虽然所用电器少，线路简单，但仅适用于不频繁起动的小容量电动机，不能实现远距离操作，安全性也不高。这两种全压起动电气原理图只有主电路，没有控制电路。手动操作闭合 QS 或 SA，则电动机 M 工作；反之，断开 QS 或 SA，则电动机停止工作。

图 4-2 是利用接触器全压起动的主电路和控制电路。

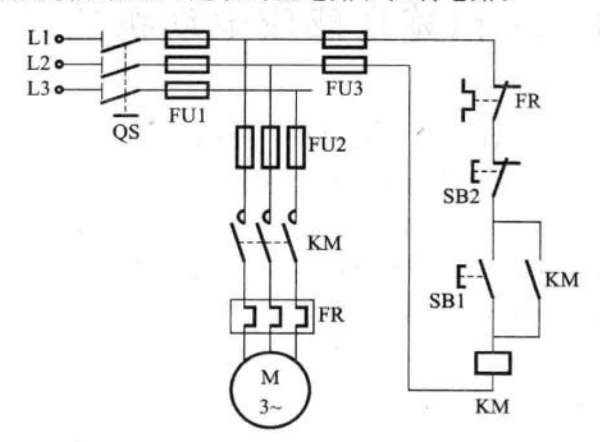


图 4-2　用接触器进行全压起动电气原理

1. 主电路分析

主电路由隔离开关 QS、熔断器 FU1 和 FU2、接触器 KM 的主触点、热继电

器 FR 的热元件和电动机 M 组成。当合上 QS 后，电动机的起动和停止由接触器 KM 主触点的状态来控制。KM 主触点闭合，电动机通电工作；反之，电动机断电停止。

2. 控制电路分析

按照电器动作顺序关系来分析，该电气原理图的工作过程为

合上QS ⟶ 按下SB2 ⟶ KM线圈得电 ⟶ { KM主触点闭合 ⟶ 电动机M运转；SB2旁KM辅助触点闭合 }

松开SB2 ⟶ SB2旁KM辅助触点仍闭合 ⟶ KM线圈继续得电 ⟶ 电动机M继续运转

在进行电气控制原理图分析时，总是需要按下 QS，故默认可以不写。本书后续的原理图分析也将省略“合上 QS”。图 4-2 中常闭按钮 SB1 是停止功能，按下后电路全部断电，多数情况下不用进行分析。

由图 4-2 可知，当按下起动按钮 SB2 再松开后，线圈 KM 能够继续保持得电，使电动机能够连续运转，这种功能称为自锁。要实现自锁功能，则需要在起动按钮 SB2 旁边并联 KM 的常开触点。这个常开触点也称为自锁触点。

在图 4-2 中，低压隔离器 QS 用来隔离电动机与三相交流电源；FR 对电动机起过载保护作用；FU1、FU2 和 FU3 分别对总电路、主电路和控制电路进行短路保护。这三种保护措施在后述的电气控制原理图中经常采用。此外，图 4-2 的控制电路本身具有零压和欠压保护功能。

4.1.2 降压起动

笼型感应电动机的起动电流是额定电流的 5～7 倍，当电动机的容量相对较大时，该起动电流会引起电网电压的急剧下降，影响同电网其他设备的正常运行；同时，全压起动也会产生较高的起动转矩，对生产机械产生冲击。因此，虽然三相笼型感应电动机全压起动电路简单，但若电动机的起动影响电网或设备时，就不宜采用全压起动。

降压起动的实质是起动时减小加在电动机定子绕组上的电压，以减小起动电流；而起动后临近额定转速时再将定子绕组上的电压增加到额定值。三相笼型感应电动机常用的降压起动方法有定子绕组串电阻、Y-△和串自耦变压器降压起动等。

1. 定子绕组串电阻降压起动

这种起动方法是在电动机定子绕组回路中串接电阻 R，起动结束后，再使电动机在额定电压下运行。图 4-3 所示为一种定子绕组串电阻降压起动的电气

控制原理图。

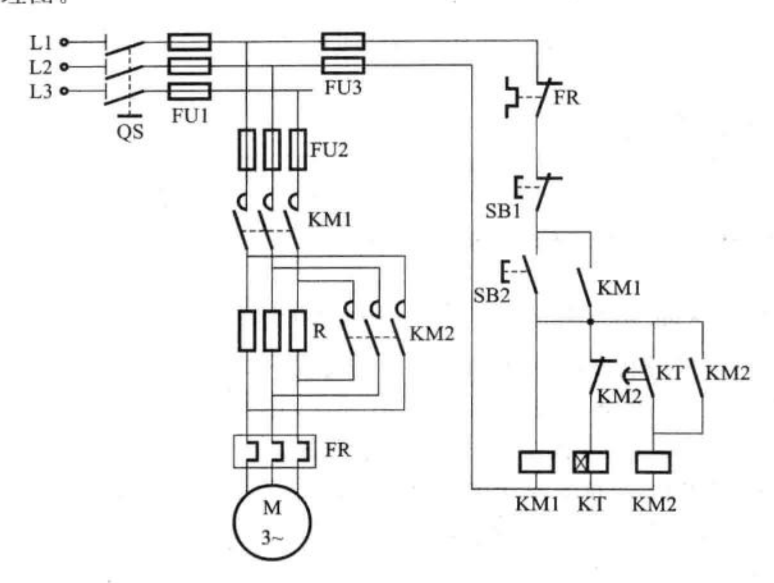


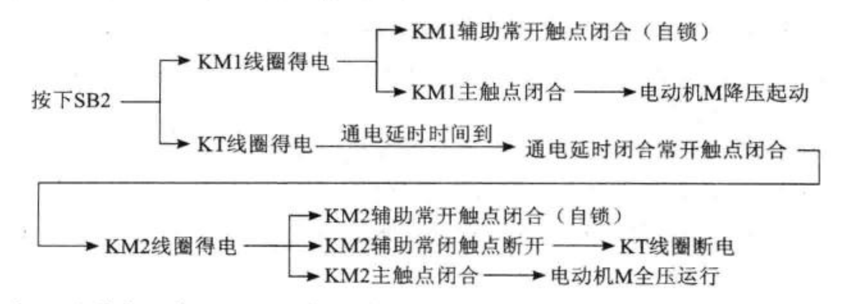
图 4-3　定子绕组串电阻降压起动电气控制原理

1）主电路分析

主电路采用两个接触器 KM1 和 KM2，其中，KM2 的用途是将电阻 R 短接。由此可见，KM1 主触点闭合，KM2 主触点断开，电动机串电阻降压起动；KM1 和 KM2 主触点均闭合，电动机全压运行。

2）控制电路分析

图 4-3 所示的控制电路中，采用了通电延时时间继电器来实现降压起动中定子绕组串电阻的短接。其工作过程为



由上述分析可知，图 4-3 中电动机起动后，要求 KM1 和 KM2 同时保持得电。但也可由该图看出，可以利用 KM2 主触点将 KM1 主触点和电阻 R 同时短路，则电动机全压运行时，KM1 和 KT 线圈均可断电，其电路如图 4-4 所示。

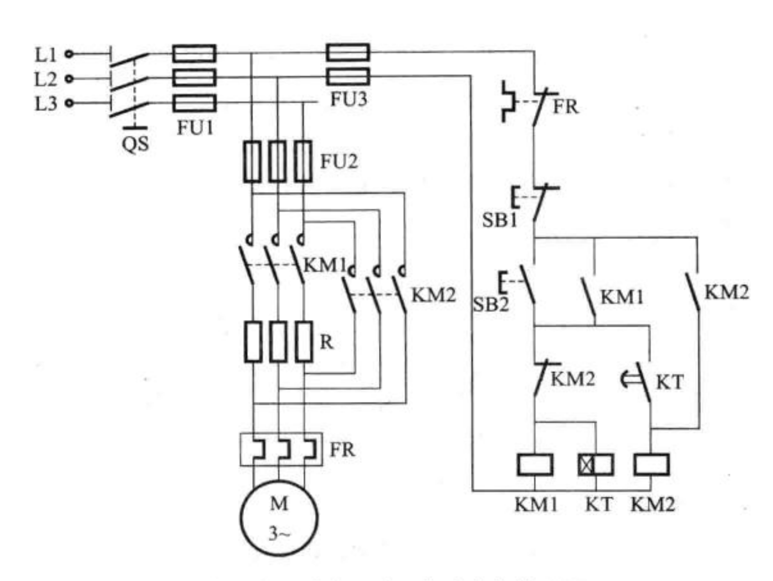
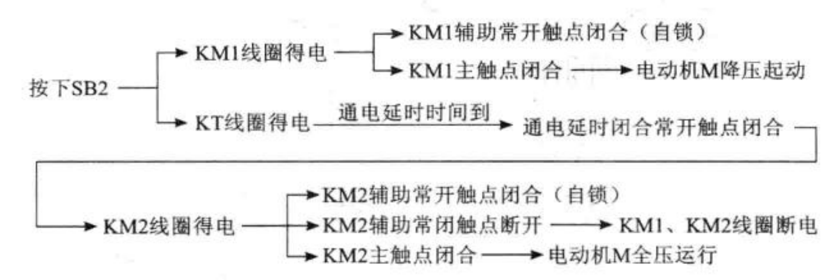


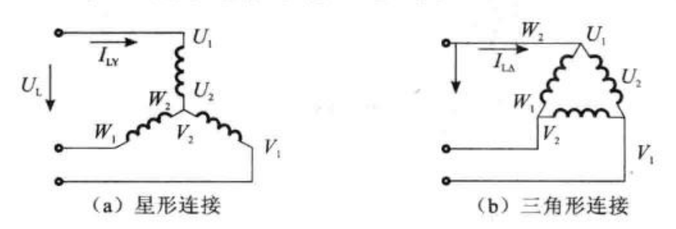
图 4-4 定子绕组串电阻降压起动电气控制原理

其工作过程为



2. Y-△降压起动

图 4-5 所示为电动机定子绕组的两种连接方法。当呈星形连接时，定子绕组电压为 220 V；当呈三角形连接时，绕组电压为 380 V。



（a）星形连接 （b）三角形连接

图 4-5 电动机定子绕组连接方式

Y-△降压起动时将电动机定子绕组接成星形，加在电动机每相绕组上的电压为线电压的 $1/\sqrt{3}$，从而减小起动电流，此时起动电流是全压起动电流的 $1/\sqrt{3}$（大约为额定电流的 4 倍）。电动机起动后经过预先整定的延时时间换接成三角形接法，从而使电动机在额定电压下正常运转。这种方法简便、经济，可用在操作较频繁的场合。

图 4-6 中，(a)图为电动机接线盒上的绕组接线柱布局，(b)图为星形连接，(c)图为三角形连接。

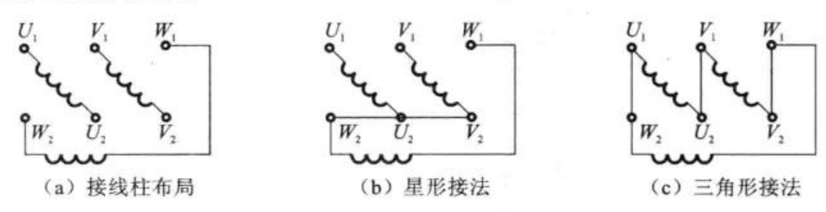


图 4-6　电动机定子绕组接线连接方法

图 4-7 所示是 Y-△降压起动的电气控制原理图。

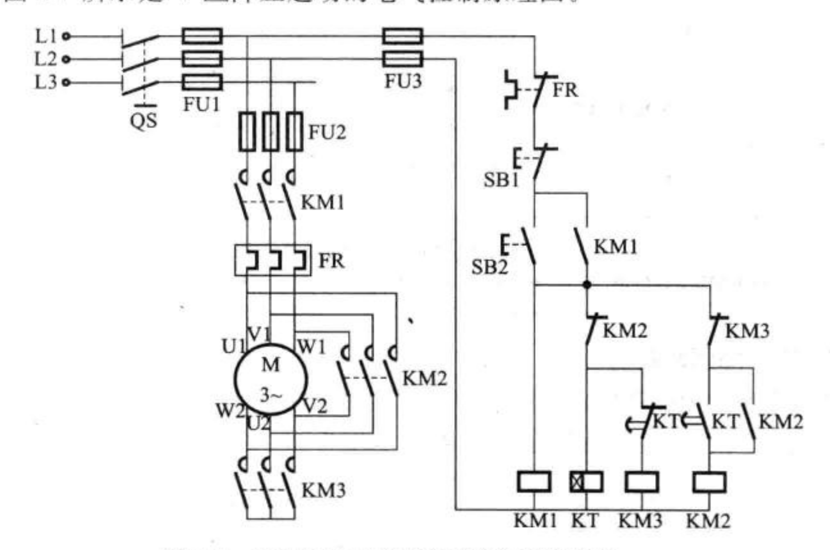


图 4-7　电动机 Y-△降压起动电气控制原理

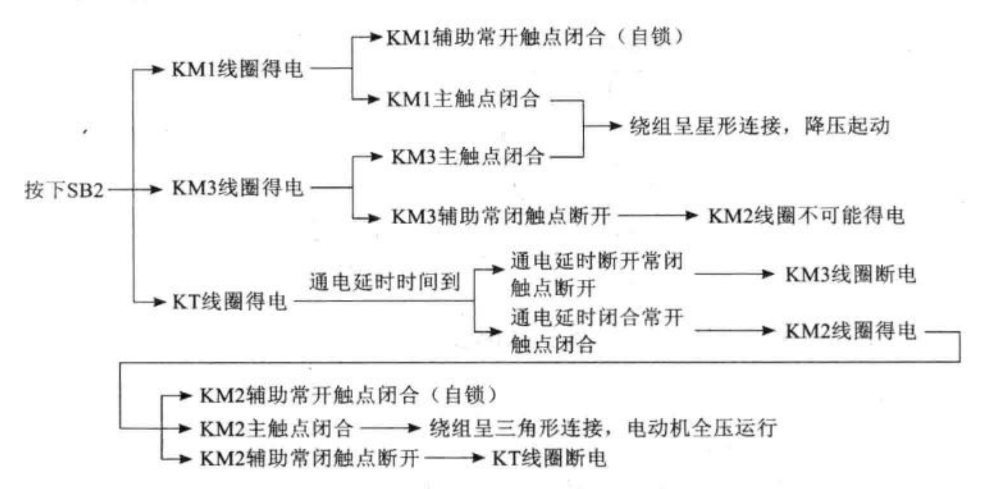
1）主电路分析

主电路采用三个接触器 KM1、KM2 和 KM3。若 KM3 主触点闭合，KM2 主触点断开，则电动机绕组的连接如图 4-6(b)所示，此时绕组呈星形连接；若 KM2 主触点闭合，KM3 主触点断开，则绕组的连接如图 4-6(c)所示，此时电动

机绕组呈三角形连接。KM2 和 KM3 的主触点不允许同时闭合，即 KM2 和 KM3 的线圈不能同时得电，否则三相交流电源将短路，这种不能同时通电的控制称为互锁控制。

2）控制电路分析

其工作过程为



根据主电路分析可知，该电路要求 KM2 和 KM3 进行互锁保护。从控制电路可以看出，在 KM2 线圈上方串联了 KM3 的辅助常闭触点，同时在 KM3 线圈上方串联了 KM2 的辅助常闭触点，以保证 KM2 与 KM3 的线圈不可能同时得电。

3. 串自耦变压器降压起动

串自耦变压器降压起动是在起动时串入自耦变压器，然后经过延时自动切除，转为全压运行。

自耦变压器的二次绕组有多个触头，能输出多种电压，可以根据具体情况选择不同的变压比，以调节电动机的起动电流和起动转矩。这种起动方式通常用于起动转矩较大而起动电流较小的场合。

自耦变压器降压起动电路不能频繁操作，如果起动不成功，第二次起动应间隔4 min以上。若在 60 s 连续两次起动后，应停电 4 h 再次起动运行，这是为了防止因自耦变压器绕组内起动电流太大而发热，以至损坏自耦变压器的绝缘。

图 4-8 为电动机串自耦变压器降压起动的电气控制原理图。

1）主电路分析

主电路采用两个接触器 KM1、KM2 以及一个自耦变压器 TC。KM1 需要

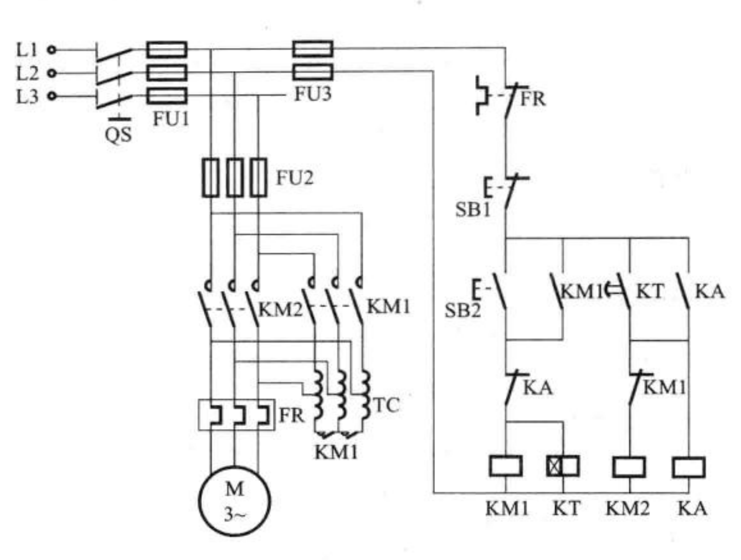
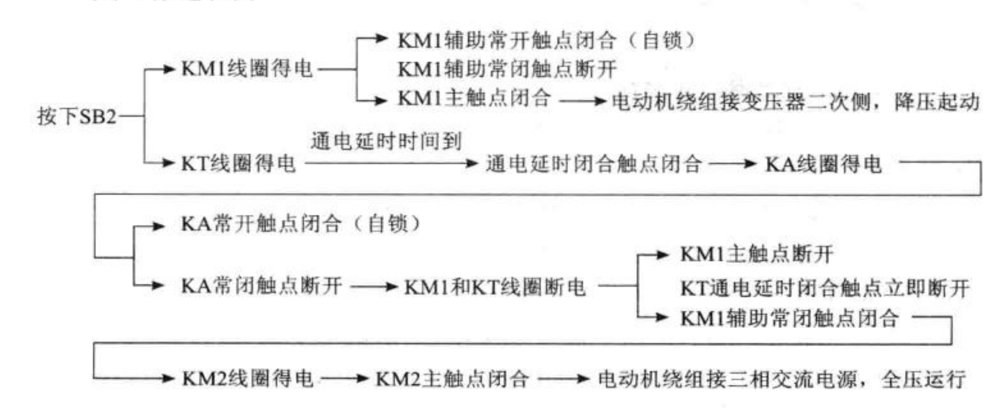


图 4-8　电动机串自耦变压器降压起动电气控制原理

5 个主触点，因而在选型时要选择五极的接触器。当 KM1 主触点闭合时，电动机绕组接在自耦变压器 TC 的二次绕组侧，电压小于额定电压；如果 KM2 主触点闭合，电动机绕组直接接入三相交流电，此时电动机全压运行。

2）控制电路分析

其工作过程为



4.1.3　软起动器

前面所述电动机降压起动方法的一个共同特点是都不能无级调整电动机的起动电压，不能使其满足平滑起停的要求。这些传统起动辅助装置的起动电

流和机械冲击仍过大。随着电力电子技术和微机技术的发展，出现了一些新型的起动装置，如变频调速器和电动机软起动器。变频调速器由于其电气特性、价格等因素决定了其主要用于电动机调速领域，一般不单纯做电动机降压起动。电动机软起动器是一种集软起动、软停车、轻载节能和多种保护功能于一体的电动机控制装置。

这里要说明的是，广义来说，凡是具有缓冲起动的都属于软起动。那么，前述提到的定子绕组串电阻起动、Y-△起动、串自耦变压器起动等均属于软起动。但鉴于软起动器来源于 Soft Starter，仅指电动机晶闸管软起动器，且其他起动装置均有相应名称，因此，软起动器专指电动机晶闸管软起动器。GB 14048.6—2008 将名称统一称之为交流半导体电机控制器或交流半导体电机起动器。

软起动器特别适用于各种泵类负载、风机类负载以及需要软起动、软停车、轻载节能等场合，广泛应用于空气压缩机、离心泵、桥式起重机、皮带运输机和自动传输线、通风机、粉碎机、切碎机、搅拌机等工业领域。

表 4-1 所示为五种起动方式的性能对比。

表 4-1　起动方式性能比较

技术指标	直接起动	传统降压起动			软起动
		定子绕组串电阻	Y-△	串自耦变压器	
起动电流（以直接起动为基准）	100%	30%～40%或 60%	58%～70%	33%	根据要求最大 90%
起动转矩（以直接起动为基准）	100%	30%～40%或 64%	33%～49%	33%	根据设定最大 100%
起动级数	1	4、3 或 2	2	2	连续无级
接到电动机线数	3	3	3	6	3
线电流过载倍数	$(5\sim7)I_N$	$(1.5\sim2.1)I_N$ 或 $3.2I_N$	$(3\sim3.5)I_N$	$1.65I_N$	$(1\sim5)I_N$

软起动器的基本原理是在电源与电动机之间串联三相晶闸管调压电路，利用晶闸管移相控制原理，控制晶闸管的导通角逐渐增大，使晶闸管的输出电压即电动机的电压逐渐增加，电动机转速逐渐增大，直至晶闸管全导通，电动机在额定电压下工作。

市场上常见的软起动器有旁路型、无旁路型以及节能型等，可根据负载特性，选用不同类型的软起动器。

(1) 旁路型。起动过程中当电动机达到额定转速时，则起动过程结束，软起动器自动用旁路接触器取代已完成任务的晶闸管，为电动机正常运转提供额定电压，以降低晶闸管的热损耗，延长软起动器的使用寿命，同时又避免了晶闸管调压对电网的谐波污染。

(2) 无旁路型。电动机起动完后，晶闸管处于全导通状态，电动机工作于全压方式，可忽略电压谐波分量，经常用于短时重复工作的电动机。

(3) 节能型。当电动机负荷较轻时，软起动器自动降低施加于电动机定子上的电压，减少电动机电流励磁分量，以提高电动机的功率因数。

图 4-9 所示为旁路型软起动器的原理框图。电动机软起动器主要由电压检测回路、电流检测回路、微处理器(CPU)、存储器、晶闸管(可控硅、SCR)、触发回路、显示器、操作键盘、KM 线圈控制等部分组成。电动机起动时，CPU 控制 SCR 的导通角，以改变电动机的输入电压，从而达到限制起动电流、保证电动机平稳起动的目的。CPU 通过检测电路，判断电动机起动是否结束，当起动结束时，将外回路配置的旁路接触器 KM 触点合上，电动机进入正常工作状态。电动机工作时，软起动器内的检测器一直监视着电动机的运行状态，并将监测到的参数送给 CPU 进行处理、存储、显示、报警等。因此，电动机软起动器还具有测量回路参数及对电动机提供可靠保护的功能。

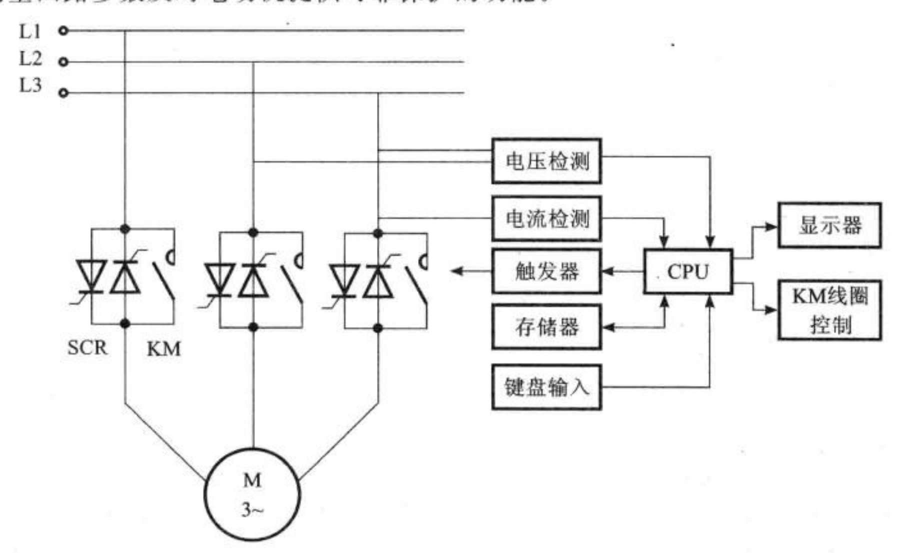
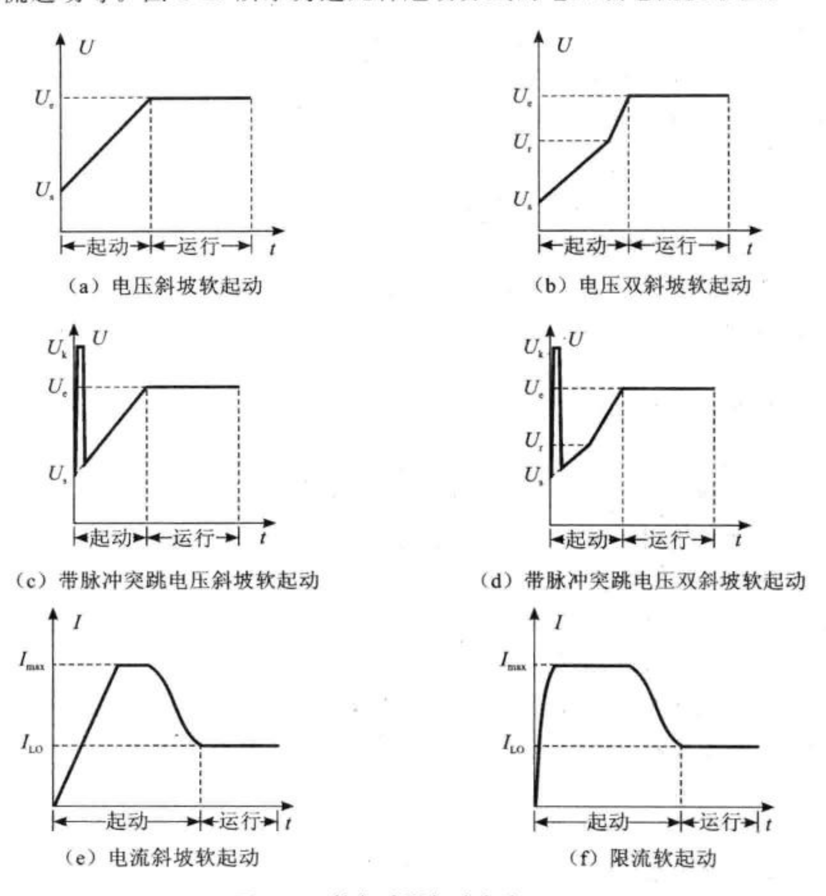


图 4-9 旁路型软起动器原理

总体来说，软起动器的控制方式分为电压控制、电流控制、转速控制和转矩控制四大类。一般情况下，软起动器的控制方式有电压斜坡控制、电流斜坡控

制、限流起动等。图4-10所示为这几种起动方式的电压或电流波形图。



(a) 电压斜坡软起动
(b) 电压双斜坡软起动
(c) 带脉冲突跳电压斜坡软起动
(d) 带脉冲突跳电压双斜坡软起动
(e) 电流斜坡软起动
(f) 限流软起动

图4-10 软起动器起动方式

1. 电压斜坡软起动

这种起动方式下软起动器的输出电压曲线如图4-10(a)所示。在起动过程中，电动机的输出力矩随电压的增加而增加。在起动时，提供一个可设置的初始电压U_s，这个初始电压需使起动转矩大于负载静摩擦力矩，以便负载能够立即运转。然后软起动器的输出电压按设定的速率(斜率可调)逐渐增加，电动机随电压的上升不断平稳加速，直至达到额定电压后，电动机达到额定转速，旁路接触器吸合，以完成起动过程。

电压斜坡方式可以设置成两个起动斜率，使电动机分段按不同的电压上升斜率起动，以使负载适应性更强，也称为电压双斜坡软起动。其电压曲线如图



4-10(b)所示。

对于有些负载在静止状态下，电动机需要很大的起动转矩才能转起来，当电动机转起来后，转矩反而小了，如球磨机。对于这类负载，采用电压斜坡控制方式，在初始阶段添加一个短时间的高脉冲电压 U_k，短暂时间后下降到按原来初始电压 U_s 线性斜率曲线继续升压。这种控制方式也称为带脉冲突跳的电压斜坡软起动。这个突跳可以加在图 4-10(a)、(b)所示的电压曲线上，从而形成图 4-10(c)、(d)所示的两种控制方式。

这种起动方式最简单，不具备电流闭环控制，仅调整晶闸管导通角，使之与时间成一定函数关系增加。其缺点是，由于不限流，在电动机起动过程中，有时会产生较大的冲击电流使晶闸管损坏，同时对电网影响较大。

2. 电流斜坡软起动

该起动方式下的电动机电流曲线如图 4-10(e)所示。这种起动方式是在电动机起动的初始阶段，起动电流逐渐增加，当电流达到预先所设定值后保持恒定，直至电动机达到额定转速，电动机电流下降至负载电流 I_{LO}，则起动过程完毕。起动过程中，电流上升变化的速率可以根据电动机的负载进行调整设定。电流上升速率大，则起动转矩大，起动时间短。该起动方式是应用最多的起动方式，尤其适用于风机、泵类负载的起动。

同理，电流斜坡也可以设置双斜率斜坡软起动，也可以是带脉冲突跳的斜坡软起动，基本控制方式与电压斜坡软起动一致，在此不再赘述。

3. 限流软起动

该起动方式下电动机的电流曲线如图 4-10(f)所示。在电动机的起动过程中，限制其起动电流不超过设定的最大值 I_{max}。起动开始后，其输出电流从零或某初始值快速上升到 I_{max}，然后保持在 I_{max}，直到电动机达到额定转速，电动机电流降至负载电流 I_{LO}，则起动过程完毕。这种起动方式的优点是起动电流小，且可按需要调整，对电网影响小。

软起动器同时还提供软停车功能。软停车和软起动过程相反，电压逐渐降低，转速逐渐下降到零，避免自由停车引起的转矩冲击。

(1) 自由停车。在这种停车模式下，软起动器接到停止命令后，立即断开旁路接触器并禁止软起动器晶闸管的电压输出，电动机线圈电压从额定电压直接变为零，电动机依负载惯性逐渐停车。自由停车相当于电动机瞬间停电的效果。

(2) 软停车模式。有许多应用场合，不允许电动机瞬间断电停机。例如：高层建筑的水泵系统，如果瞬间停机，会产生巨大的“水锤”效应，使管道甚至水泵

遭到损坏。为减少和防止"水锤"效应,需要电动机逐渐停机,即软停车。在这种停车模式下,电动机的供电由旁路接触器切换到软起动器的晶闸管输出,软起动器的输出电压由全压逐渐减小到某值,然后由该电压值直接降为零电压。软停车可使电动机转速平稳降低,以避免机械震荡。

4.2 三相笼型感应电动机的正反向运行控制

生产机械往往要求运动部件能够实现正反两个方向的运动,如机床工作台的前进与后退、主轴的正反转、起重机吊钩的升与降等,实现方式有多种,其中,最简单的办法是利用电动机的正反转功能。由三相笼型感应电动机转动原理可知,若要电动机反向运行,只需将电动机定子的三相电源相序反相即可。

常用的电动机正反转控制电路有两大类,即手动控制和自动控制。

4.2.1 手动控制的正反向运行

常用的手动正反向控制主要由转换开关(或万能开关)或按钮来控制。

1. 转换开关控制的正反向运行

图 4-11 所示为一种最简单的转换开关控制的正反向运行电路。

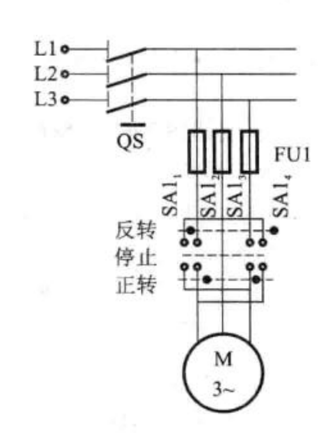


图 4-11 转换开关控制正反向运行电路

图 4-11 中,转换开关 SA1 用于切换 L1 和 L3 两相,而 L2 相不经过 SA1 的触点。当 $SA1_2$ 和 $SA1_3$ 常开触点同时闭合时,电动机相序正接,此时电动机正转;当 $SA1_1$ 和 $SA1_4$ 常开触点同时闭合时,电动机相序反接,此时电动机反转;当四个常开触点均断开时,电动机处于断电状态。这里要注意的是,转换开关 SA 一般不适合于带负载切换,也就是说该电路需要先通过 SA 选择正/反转,然后合上隔离开关 QS。同时,这种电气控制原理图只适合于5.5 kW以下的小容量电动机。图 4-12 所示是具有远程控制功能的方案。

图 4-12 中,转换开关 SA1 负责选择电动机的旋转方向,接触器 KM1 负责

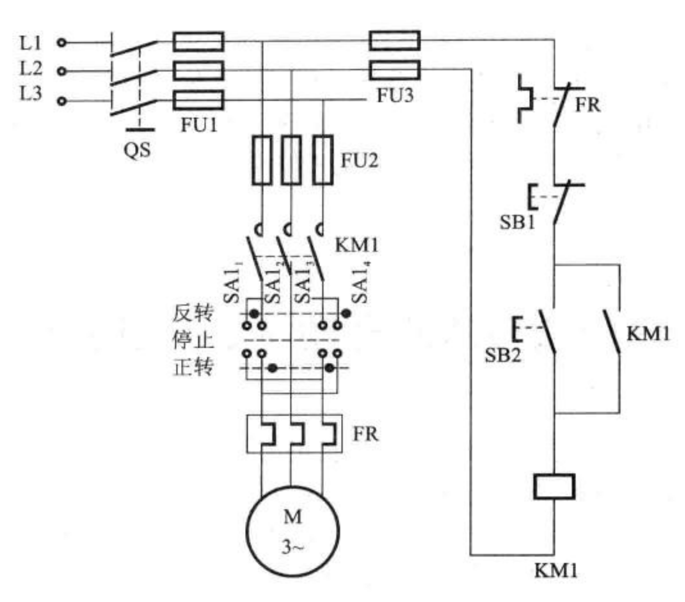


图 4-12　由转换开关和按钮控制的正反向运行电路

电动机的起动和停止，分别由按钮 SB2 和 SB1 来实现。其工作过程为

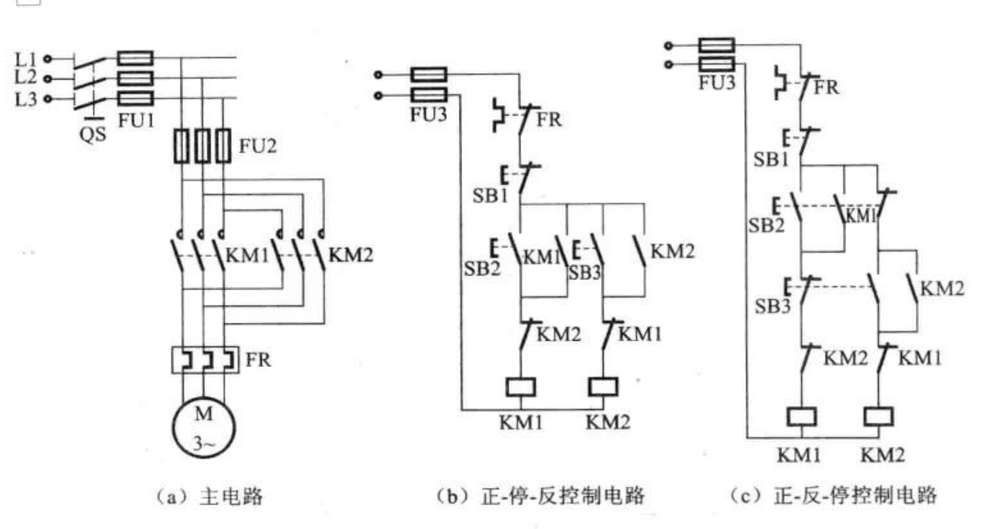
选择SA1 → 合上QS → 按下SB2 → KM1线圈得电 → KM1辅助常开触点闭合（自锁）；→ KM1主触点闭合 → 电动机起动

2. 按钮控制的正反向运行

由于转换开关 SA 一般不能带负载切换正反转，所以更常见的是采用两个接触器来实现工作过程中的带负载切换正反转，图 4-13 所示为其电气控制原理图。

在图 4-13(b)所示的控制电路中，若按下起动按钮 SB2，线圈 KM1 得电并自锁，电动机正向运转；若按下起动按钮 SB3，线圈 KM2 得电并自锁，电动机反向运转。为了避免电源意外短路，要求 KM1 和 KM2 互锁。对于正反向运行的电路，必须设置互锁保护。即在 KM1 线圈上方串联 KM2 的辅助常闭触点，在 KM2 线圈上方串联 KM1 的辅助常闭触点。该电路的特点在于，正反转的切换必须要经过停止按钮 SB1。

图 4-13(c)所示为在正向起动按钮 SB2 的支路上串联了反向起动按钮 SB3 的常闭触点，在反向起动按钮 SB3 的支路上串联了正向起动按钮 SB2 的常闭触点。这种电路正反转切换时不需要经过停止按钮。控制电路中的复合按钮也起到了互锁的效果，通常把复合按钮实现的互锁称为机械互锁，把接触器常闭触点实现的互锁称为电气互锁，机械互锁不能替代电气互锁。



(a) 主电路　　(b) 正-停-反控制电路　　(c) 正-反-停控制电路

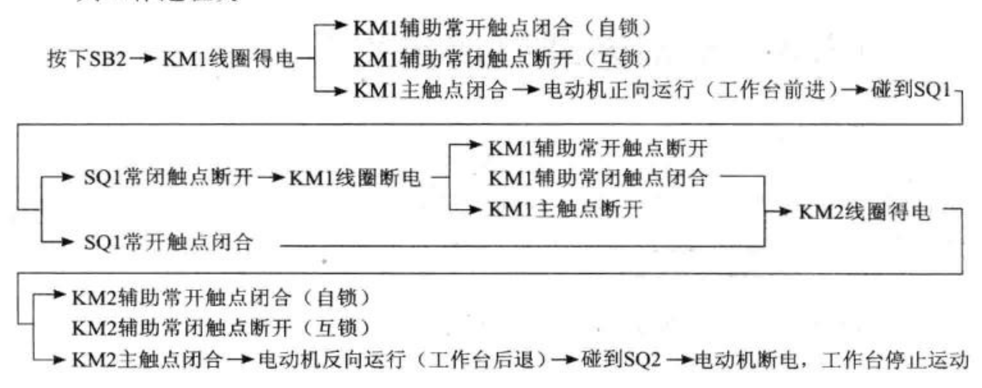
图 4-13　电动机正反向运行主电路

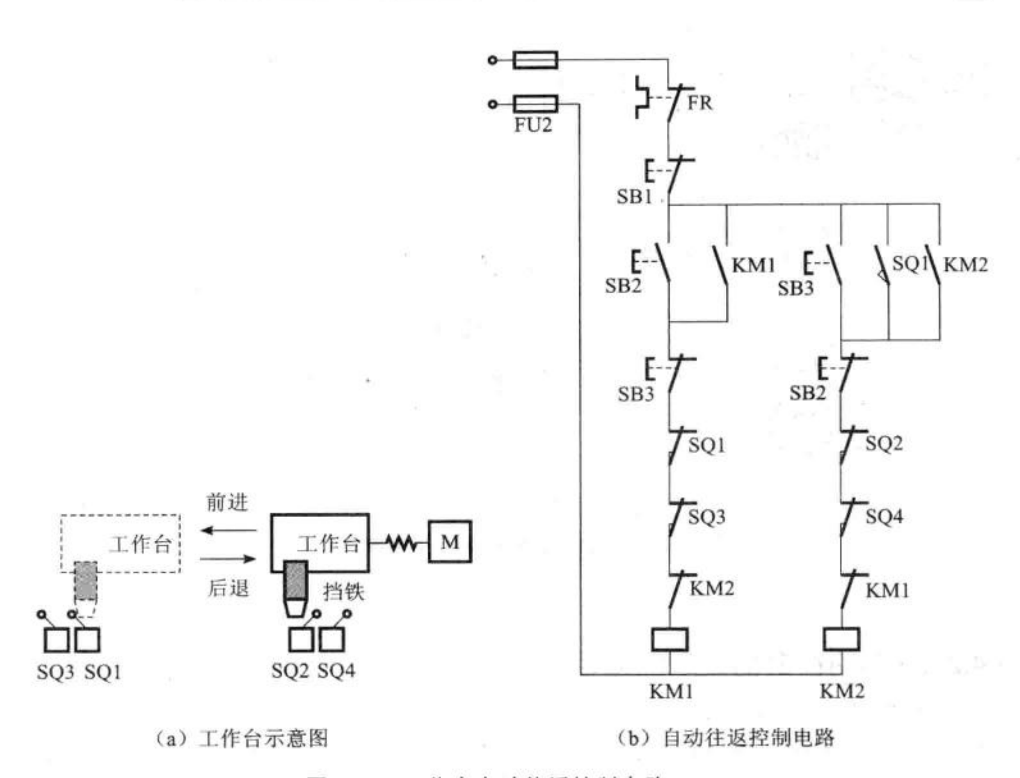
4.2.2 自动往返的正反向运行

生产过程中,某些设备的工作台需要自动往复运行,如组合机床、龙门刨床、铣床等,此时电动机的旋转方向由工作台上的位置检测开关来切换。行程开关、光电开关或接近开关等便是常用的位置检测开关。

图 4-14 所示为行程开关控制的电动机自动正反转控制电路。图 4-14(a)所示为工作台及安装在工作台上的行程开关示意图。工作台由电动机 M 拖动,主电路如图 4-13(a)所示。行程开关 SQ1 和 SQ2 是行程到位的检测开关。图 4-14(b)所示为一种基于行程开关自动控制的正反转控制电路。

其工作过程为





（a）工作台示意图　　　（b）自动往返控制电路

图 4-14　工作台自动往返控制电路

图中，SQ3 和 SQ4 起限位保护作用，防止因 SQ1 或 SQ2 失灵而导致设备损坏。在行程控制场合，一般都需要设置限位保护。

4.3　三相笼型感应电动机的制动控制

对于一些生产机械来说，为了适应生产工艺、提高生产效率或考虑生产安全，往往要求电动机能够迅速停车和准确定位。由于电动机存在惯性，从断电到完全停止转动需要一定的时间，因此，需要对电动机进行制动，强迫其立即停车。

电动机制动方法一般分为两大类，即机械制动和电气制动。

4.3.1 机械制动

机械制动是在电动机轴上外加机械装置，在电动机断电后，通过控制使该机械装置在电动机轴上产生摩擦阻力，以使电动机转子迅速停止转动的一种方法。应用较多的机械制动装置是电磁制动器，俗称电磁抱闸。

电磁制动器的电气控制原理图如图 4-15 所示。电磁制动器由电磁机构和制动器两部分组成。电磁机构包括铁芯、衔铁和线圈三部分；制动器由闸轮、闸瓦、杠杆和弹簧等部分组成，闸轮装在电动机的转子轴上。

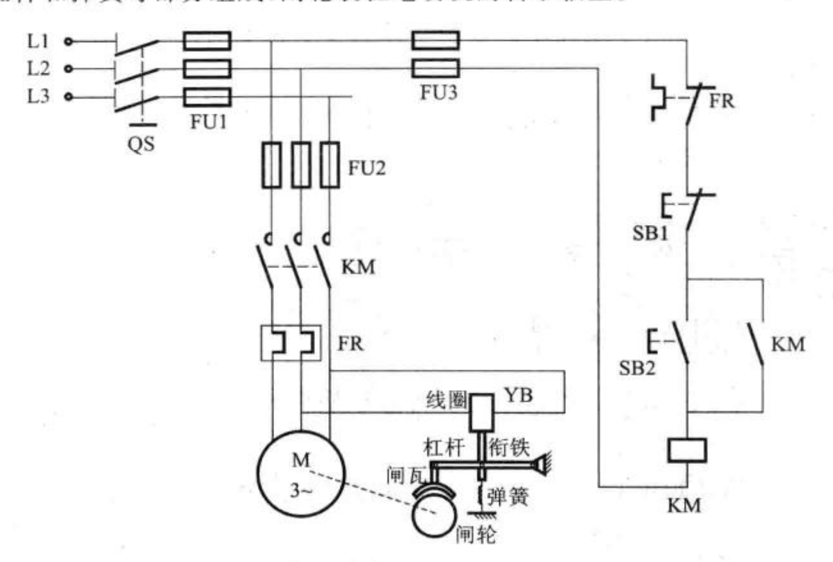


图 4-15 电磁制动器电气控制原理

其工作过程为



该电磁制动器在线圈断电时对电动机轴进行机械抱闸。还有一种抱闸方式为线圈通电抱闸。读者可试绘制其电气控制原理图。



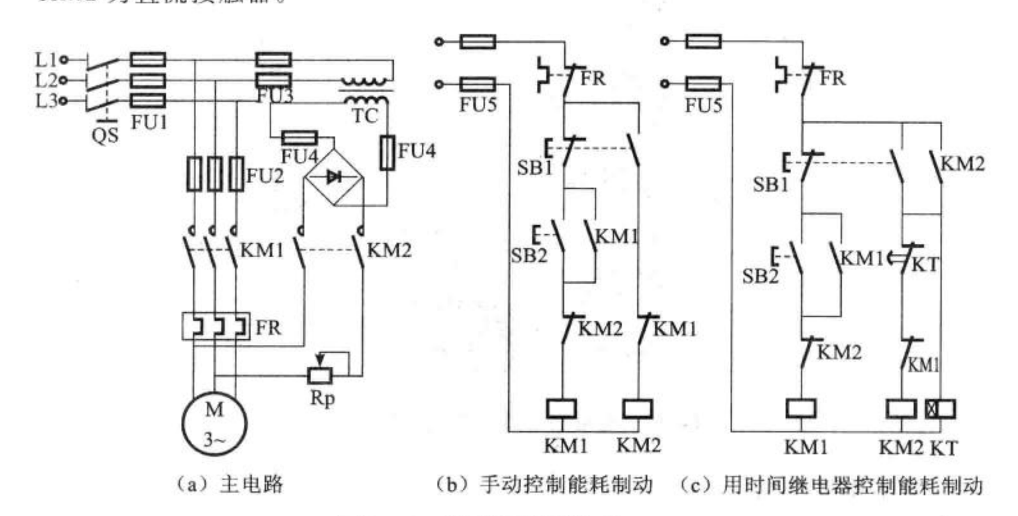
4.3.2 电气制动

所谓电气制动，是指在停车过程中，引入与电动机惯性旋转方向相反的电磁转矩，使电动机迅速停止转动。三相笼型感应电动机的电气制动包括能耗制动和反接制动等。

1. 能耗制动

能耗制动是在电动机断电时，给定子绕组添加一个直流电源，利用转子感应电流与静止直流磁场作用产生制动转矩。此时电动机把转子储存的机械能变成电能并消耗在转子电路中。该制动方法要求在电动机制动后能及时断开直流电源。

图 4-16 所示为能耗制动的电气控制原理图。其中，KM1 为交流接触器，KM2 为直流接触器。



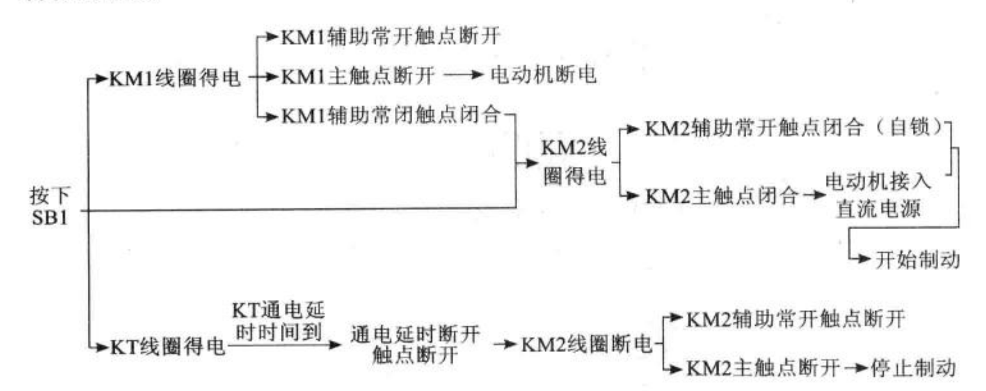
（a）主电路　（b）手动控制能耗制动　（c）用时间继电器控制能耗制动

图 4-16　能耗制动控制电路

对于图 4-16(b)，电气制动工作过程为



对于图 4-16(c)所示电路，其起动过程与图(b)相同，仅制动过程不一样，其制动过程为



能耗制动适用于电动机容量大、要求制动平稳和制动频繁的场合。在控制上需要一个交直流电源转换装置，控制线路较复杂。

2. 反接制动

反接制动是在切断电动机电源后，将三相交流电源反相序接于电动机定子绕组，定子产生反向旋转磁场，从而向转子施加较大的制动力矩。这种方法关键在于电动机转速接近零时，应立即切断反接制动电源，否则电动机会向相反方向旋转。

由于电动机的制动时间与电动机转速、负载力矩大小等因素有关，所以，不能按施加反相电源的时间来控制电动机的反接制动。为了及时切断反接制动电源，一般需要使用速度继电器，它与电动机同轴连接。图 4-17 所示为反接制动的电气控制原理图。

其工作过程为



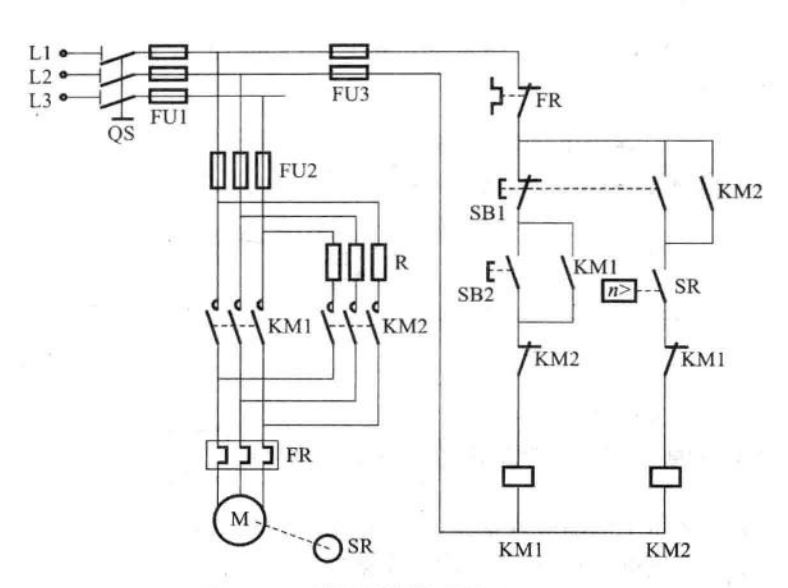


图 4-17 反接制动电气控制原理

直接反接制动时，转子与旋转磁场的相对速度接近于同步转速的两倍，所以，定子绕组中流过的反接制动电流相当于全压起动时电流的两倍。因此制动迅速但制动力大，对设备的传动部件有较大的冲击，通常适用于不经常制动和制动 10 kW 以下的小容量电动机。为了减小制动电流和机械冲击，通常在主电路中串联反接制动电阻 R。

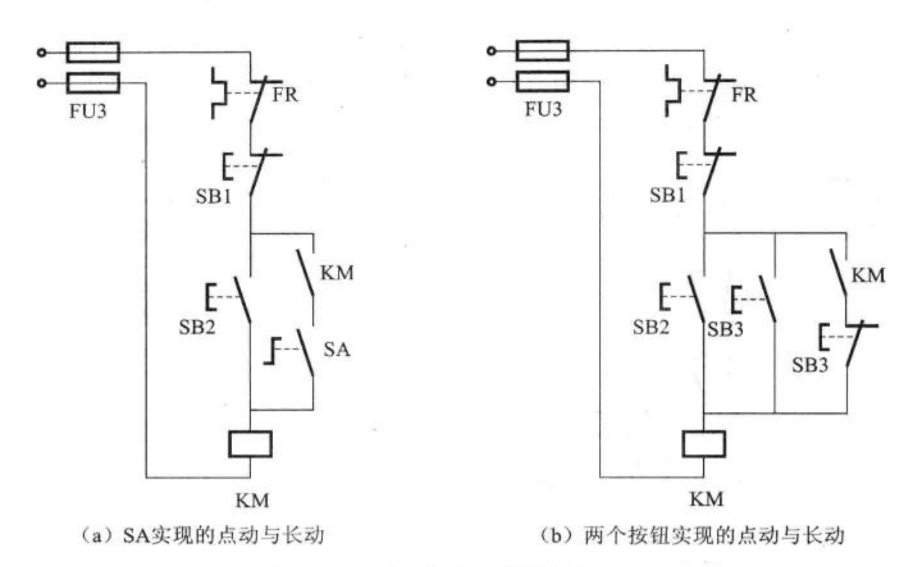
4.4 三相笼型感应电动机的其他基本控制电路

在生产机械的工艺要求中，还经常需要一些特定功能，如对刀时需要点动调整、润滑泵要先于主轴工作、大型机械需要多地点起停控制等。下面重点讲述点动、顺序起停、多地点及多条件控制电路。

4.4.1 点动与长动控制

图 4-18 所示为常用的点动与长动控制电路。

图 4-18(a)中，SA 断开时，按下 SB2，KM 线圈得电，此时 KM 辅助常开触



（a）SA实现的点动与长动　　（b）两个按钮实现的点动与长动

图 4-18　点动与长动控制电路

点虽然闭合，但其下方的 SA 常开触点处于断开状态，没有形成自锁，则 KM 控制的电动机点动运行。当 SA 旋合时，按下 SB2，KM 线圈得电，此时由于 KM 的辅助常开触点和 SA 常开触点均闭合而形成自锁，则 KM 控制的电动机连续运行，连续运行也称长动。

图 4-18(b)中，若按下 SB2，KM 线圈得电，同时 KM 的辅助常开触点和 SB3 常闭触点均闭合，故形成自锁，则 KM 控制的电动机长动运行。若按下 SB3，KM 线圈得电，此时 KM 辅助常开触点虽然闭合，但其下方的 SB3 常闭触点处于断开状态，没有形成自锁；当 SB3 松开时，其常开触点先断开，然后其常闭触点才闭合，还是不能让 KM 线圈得电自锁；因此，SB3 为点动按钮。

由以上分析可知，点动与长动的区别在于自锁触点是否发挥了作用，自锁触点起作用时即为长动，无自锁触点或者自锁触点失去自锁作用时即为点动。

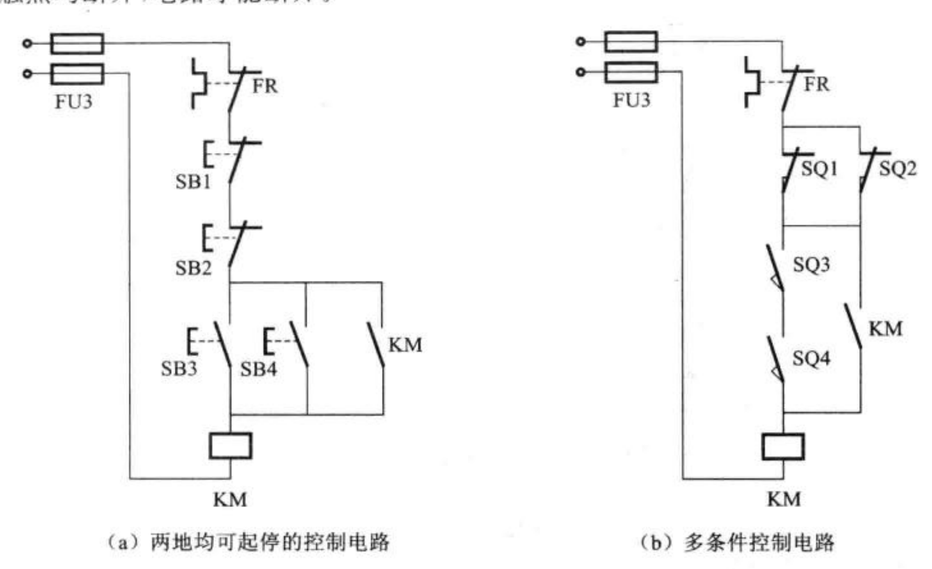
4.4.2　多地点或多条件控制

在较大型的机械设备上，为能够方便和及时地操作设备，常要求能在设备四周进行诸如起停等相同功能的手动控制，实现的方法是将分散在设备四周各操作站上起动按钮的常开触点并联、停止按钮的常闭触点串联。图 4-19(a)为两地点起停控制电路。

在一些自动机械设备中，为了能安全运行，常需要满足多个条件后，才能进



行后续工步的动作。图 4-19(b)所示为由行程开关实现的多条件控制电路，只有 SQ3 和 SQ4 的常开触点均闭合，电路才能接通；也只有 SQ1 和 SQ2 的常闭触点均断开，电路才能断开。



(a) 两地均可起停的控制电路 (b) 多条件控制电路

图 4-19 多地点或多条件控制

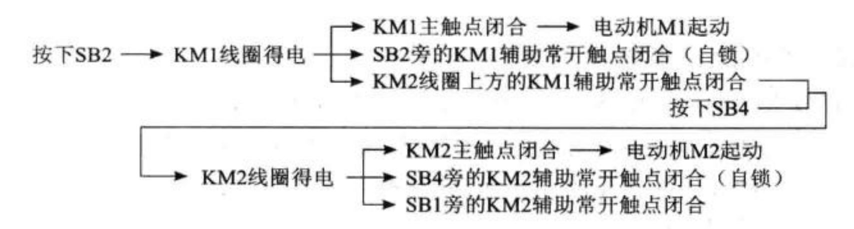
4.4.3 联锁控制

1. 顺序起停控制

顺序起动是指一台电动机起动之后，另一台电动机才能起动；同样地，顺序停止是指一台电动机停止之后，另一台才能停止。常用在有顺序起停要求的场合，如铣刀旋转之后才能进给、先润滑才能起动主轴等。

图 4-20 所示为一种顺序起停的电气控制原理图。

其顺序起动过程为



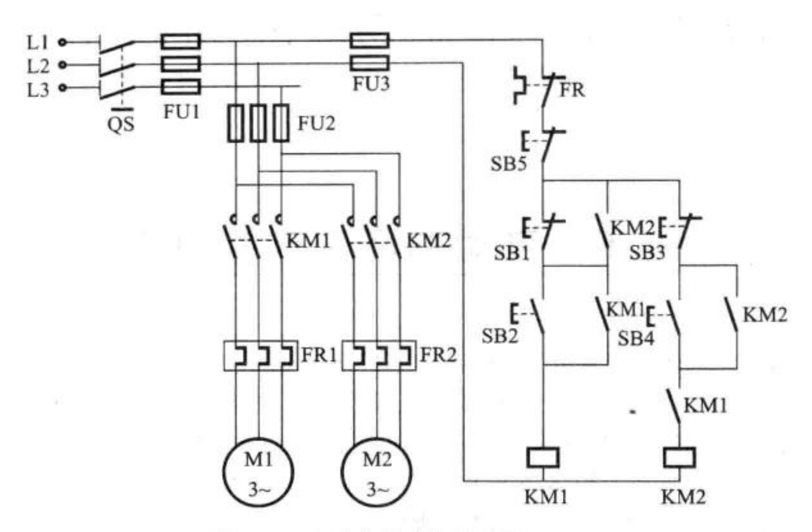
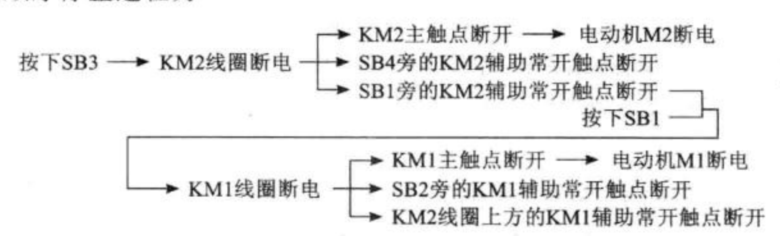


图 4-20 顺序起停电气控制原理

其顺序停止过程为



从以上分析可知，只有先起动 M1 后，才能起动 M2；只有先使 M2 停止后，才能将 M1 停止。从图 4-20 也可看出，顺序起动是先起动电动机接触器的辅助常开触点串联在后起动电动机的控制电路中，顺序停止是先停止电动机接触器的辅助常开触点并联在后停止电动机的停止按钮旁。

2. 互锁控制

互锁控制常用于以下两种情况。

(1) 对于单台电动机，若其主电路的电源线有两种接法(通过多个接触器改变接法)，并且这两种接法不允许同时出现，否则，会使电源短路。这种情况下，必须使用互锁控制。如图 4-13 所示的电动机正反转主电路，正转接法与反转接法不能同时实施，即 KM1 与 KM2 主触点不能同时闭合，因而需要在其控制电路中进行互锁控制。

(2) 对于具有两台或两台以上电动机的设备，为了设备的安全运行，要求这些电动机不能同时运行，这时也需要互锁控制。若图 4-13 所示控制电路中的



KM1、KM2 接触器分别控制两台电动机，为保证两电动机不能同时起动运行，将常闭触点$\overline{\mathrm{KM1}}$、$\overline{\mathrm{KM2}}$分别串接在 KM2、KM1 的线圈控制电路中。

4.5 自动循环工作控制电路

诸如组合机床等自动化设备，在对零件进行加工的过程中，需要自动顺序完成定位、夹紧、快进、工进、快退等工步操作。这种自动循环工作的控制电路按设备拖动方式的不同分为两类：一类为对电动机拖动的设备进行控制，另一类为对液压系统驱动的设备进行控制。这两类自动循环工作控制电路的分析方法相同，都是先分析动力线路即电动机主电路或液压油路，然后分析其电气控制电路。

组合机床一般采用多轴、多刀、多工序同时加工，以完成钻、扩、铰、镗、铣及攻丝等工序。其主要通用部件为单轴或多轴头和动力滑台。单轴或多轴头完成切削运动，而进给运动则由动力滑台来完成，以实现不同的工作循环。动力滑台一般有机械动力滑台和液压动力滑台。

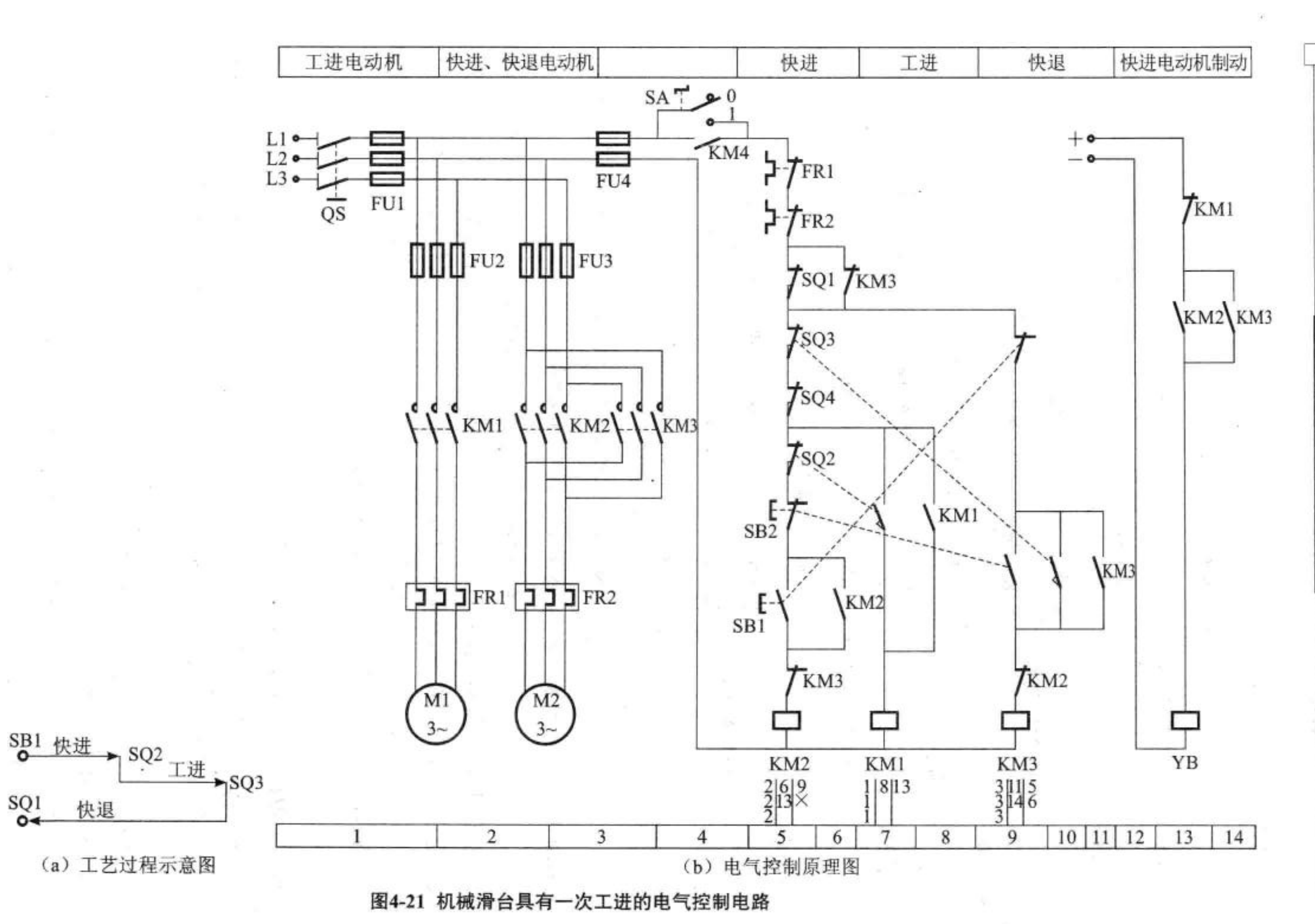
4.5.1 机械动力滑台控制电路

机械动力滑台由滑台、滑座和双电动机（快进和工进电动机）、传动装置三部分组成，滑台的自动工作循环由机械传动和电气控制完成。

图 4-21 所示为机械滑台具有一次工作进给的工作循环图及电气控制电路图。图中的 SQ1、SQ2、SQ3 分别为原位、快进转工进和终点行程开关，SQ4 为限位保护开关。

KM4 为滑台上切削头主轴电动机控制用接触器，SA 为单独调整转换开关。正常工作时，只有等主轴电动机起动后，即 SA 置于“0”位、KM4 辅助常开触点闭合，M1 和 M2 电动机才能起动。当滑台需要单独调整时，可将 SA 置于“1”位。

主电路中，M1 为工进电动机，单向运转；M2 为快进、快退电动机，需要正反向运转。为了在快进或快退到位后，能及时转换为工进或停于原位，需要对电动机 M2 进行制动。电动机 M2 的制动器为断电型制动器（机械式制动），YB 为该电磁制动器的线圈，在 YB 断电时制动。



（a）工艺过程示意图

（b）电气控制原理图

图4-21 机械滑台具有一次工进的电气控制电路



图 4-21 的控制过程如下。



在工进至终点时，若行程开关 SQ3 失灵，就会越位至行程开关 SQ4 处，SQ4 受压，使 KM1 断电，从而使电动机 M1 停车，故 SQ4 起行程限位保护作用。此时，若要退至原位，按下 SB2 即可，故 SB2 为手动调整快退按钮。当随机停电时，滑台停在中途，来电后可用 SB2 调至原位。

4.5.2 液压动力滑台控制电路

液压传动系统易获得较大的力矩、运动传递平稳均匀、调节控制方便，在组合机床、自动化机床、机械加工自动线、数控机床等机械制造行业也有着广泛的应用。

液压动力滑台与机械动力滑台的差别在于，液压滑台的动力来自液压泵，而机械滑台的动力来自于电动机。

液压滑台由滑台、滑座及油缸三部分组成，油缸拖动滑台在滑座上移动。

图 4-22 所示为具有一次工作进给的液压动力滑台控制系统。其电气控制

系统需对液压系统电磁换向阀的线圈进行通电和断电控制，以使液压动力滑台完成自动工作循环。

1. 液压系统工作过程分析

图 4-22(a)所示的液压系统中，YV1 为三位五通换向阀，YV2 为二位二通换向阀。

1）滑台快进

当 $YV1_1$、$YV2_1$ 通电时，YV1 和 YV2 换向阀均处于左位，此时油液的流动情况如下。

进油路：液压泵→YV1 左位→液压缸无杆腔。

回油路：液压有杆腔→YV1 左位→YV2 左位→液压缸无杆腔。

由于形成了差动连接，所以活塞杆快速右移，带动滑台快速前进。

2）滑台工进

当 $YV1_1$ 通电、$YV2_1$ 不通电时，YV1 处于左位，YV2 处于右位，此时油液的流动情况如下。

进油路：液压泵→YV1 左位→液压缸无杆腔。

回油路：液压有杆腔→YV1 左位→滤油器→调速阀→油箱。

由于回油路中接了调速阀，使滑台进行慢速右移的工进，工进速度可由调速阀实现无级调速。

3）滑台快退

当 $YV1_2$ 通电、$YV2_1$ 不通电时，YV1 处于右位，YV2 处于右位，此时油路情况如下。

进油路：液压泵→YV1 右位→液压缸有杆腔。

回油路：液压缸无杆腔→YV1 右位→油箱。

油路的换向使得液压缸活塞左移，且回油无阻力，从而带动滑台快速退回。

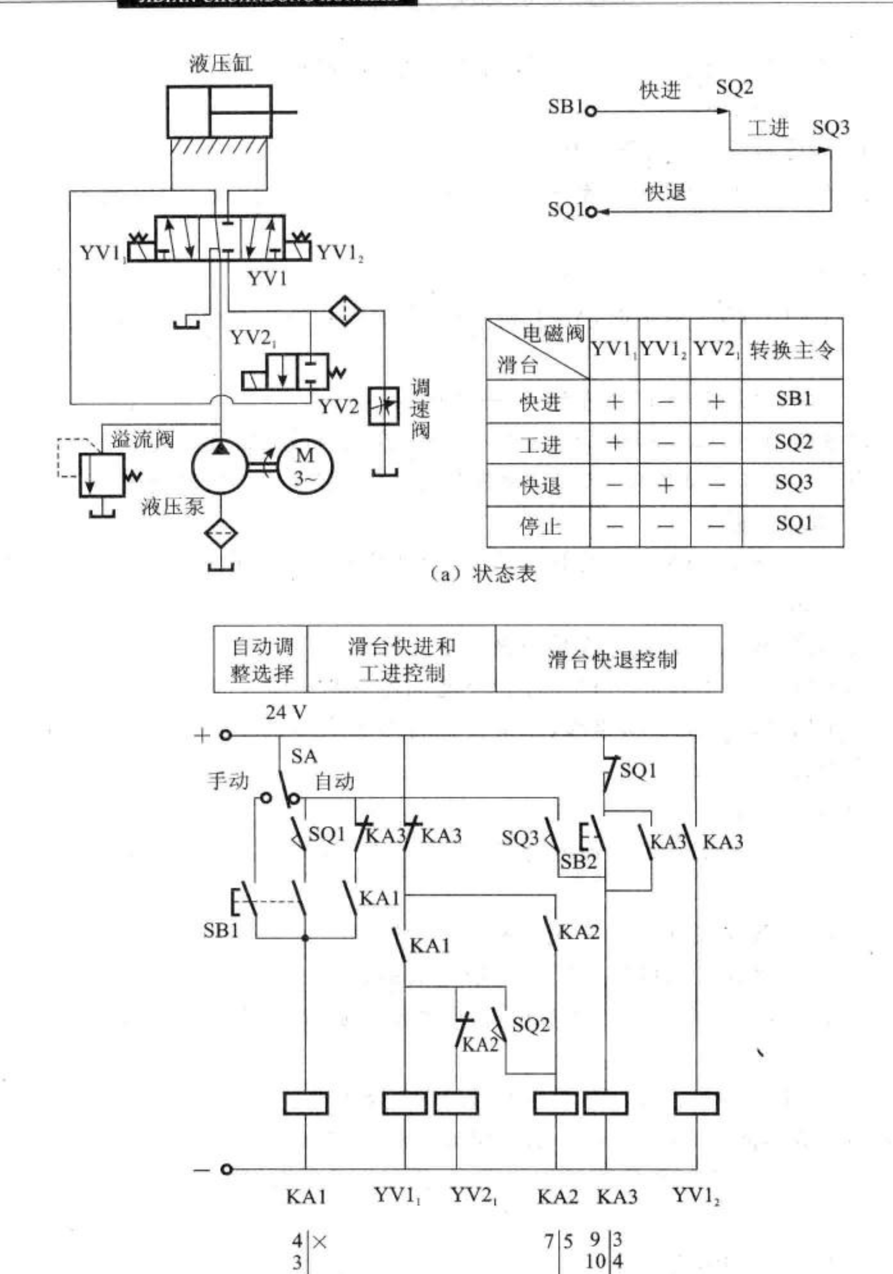
4）滑台停止

当 $YV1_1$、$YV1_2$、$YV2_1$ 都不通电时，YV1 处于中位，YV2 处于右位，此时液压泵输出的油液经电磁阀 YV1 的中位流回油箱，滑台处于停止状态。

以上滑台运动与电磁阀 $YV1_1$、$YV1_2$、$YV2_1$ 通/断电的关系如图 4-22(a)所示。

2. 电气控制电路分析

液压动力滑台的电气控制电路如图 4-22(b)所示。由于电磁阀没有触头，对短信号无自锁能力，故控制电路中需要使用中间继电器。



滑台 \ 电磁阀	YV1₁	YV1₂	YV2₁	转换主令
快进	+	−	+	SB1
工进	+	−	−	SQ2
快退	−	+	−	SQ3
停止	−	−	−	SQ1

（a）状态表

（b）电气控制电路

图 4-22 液压动力滑台控制系统

1）滑台处于原位

滑台位于原位时，为停止状态。此时，电磁阀 $YV1_1$、$YV1_2$、$YV2_1$ 均为断电状态，行程开关 SQ1 被压下，其常开触点闭合、常闭触点断开。

2）自动循环工作控制

在滑台处于原位时，滑台上的撞块压下 SQ1，此时将转换开关 SA 扳到"自动"位置，然后按下起动按钮 SB1，液压动力滑台即自动按快进→工进→快退→原位停止的顺序进行工作。其自动循环工作过程如下。



3）滑台的手动调整

滑台的手动调整控制功能用于滑台快速前移或快速返回原位的操作。

将转换开关 SA 扳到"手动"位置，按下按钮 SB1，KA1 线圈得电，从而 $YV1_1$、$YV1_2$ 得电，滑台可向前快进。由于 KA1 线圈支路不能实现自锁，因而当松开 SB1 后，滑台停止。此功能可以实现滑台前进方向的点动调整。

在设备的实际使用中，当调整过程中使滑台前移离开原位，或者在工作过程中突然停电，均使滑台不在原位，SQ1 不被压下，不能开始自动循环工作。此时按下 SB2，使 KA3 得电并自锁，$YV1_2$ 通电，滑台快退，退到原位时，压下 SQ1，KA3 断电，$YV1_2$ 断电，滑台停止于原位。因此，SB2 是滑台快速复位按钮。

3. 具有工进终点停留功能的控制电路

在上述电路中，若需要滑台工进到终点时，增加停留功能，即使工作循环成为快进→工进→延时停留→快退，则控制电路如图 4-23 如示。

图 4-23 与图 4-22 比较，只是多加了一个时间继电器 KT。图 4-23 是在图4-22 的基础上，将 KA3 的两个常闭触点用 KT 的两个瞬时常闭触点代替，用 SQ3 控制

KT，再用 KT 的延时常开触点替换 SQ3 的常开触点对 KA3 进行控制。

图 4-23 中，当滑台工进到终点时，压下 SQ3，SQ3 常开触点闭合，KT 线圈得电，此时 KT 的两个瞬时常闭触点断开，使 $YV1_1$、$YV2_1$ 断电，滑台停止工进。当 KT 延时时间到后，KT 延时常开触点闭合，KA3 线圈得电且自锁，从而 $YV1_2$ 得电，滑台才开始快速后退。

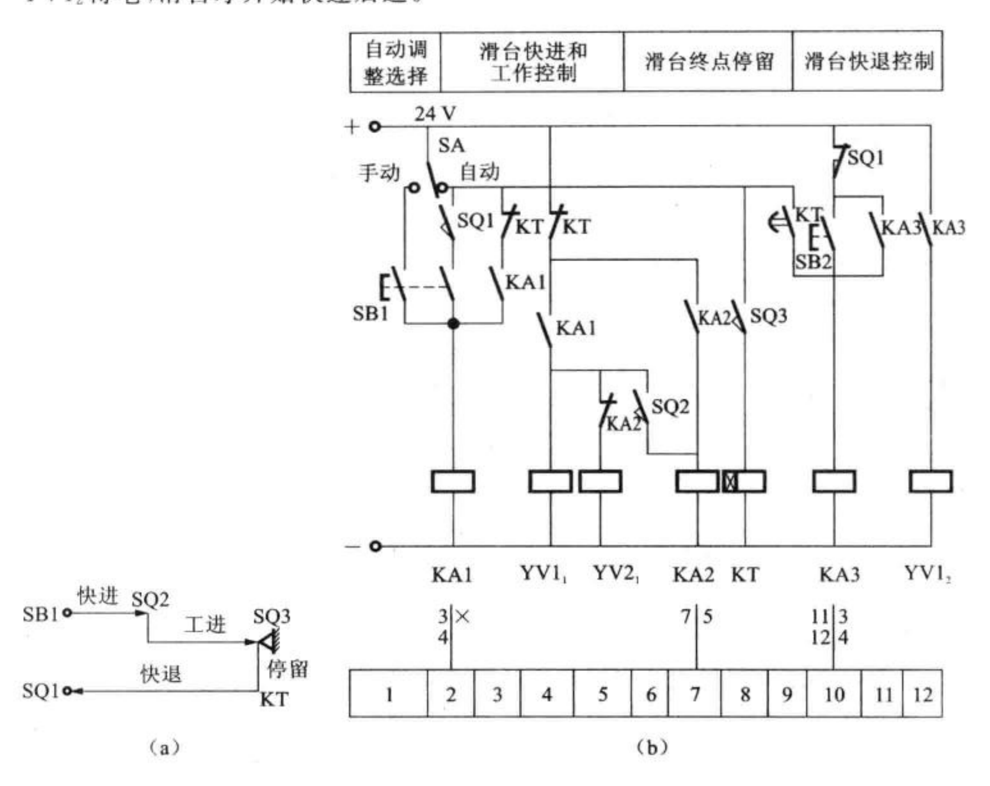


图 4-23　具有终点停留功能的液压动力滑台控制电路

4.6　双速笼型感应电动机的调速控制

三相感应电动机的转速可表示为

$$n = (1-s)n_0 = (1-s)\frac{60f}{p} \tag{4-1}$$

式中：s——转差率；

f——电源频率；

p——定子磁极对数；

n_0——同步转速。

从式(4-1)可知，若能改变定子绕组的磁极对数 p，就能改变电动机的转速。多速电动机常用来改善设备的调速性能和简化机械变速装置，一般有双速、三速、四速电动机，双速电动机是最简单的多速电动机。

4.6.1 定子绕组的连接

双速电动机常见的接线方式有△/YY 和 Y/YY 两种。

1. △/YY 接法

图 4-24(a)、4-24(b)、4-24(d)是定子绕组△/YY 接法示意图，当接线端子 1、2、3 接三相电源，4、5、6 端子悬空时，电动机定子绕组接成△形电路；当 4、5、6 端子接电源，1、2、3 端子短接时，定子绕组接成 YY 形电路。

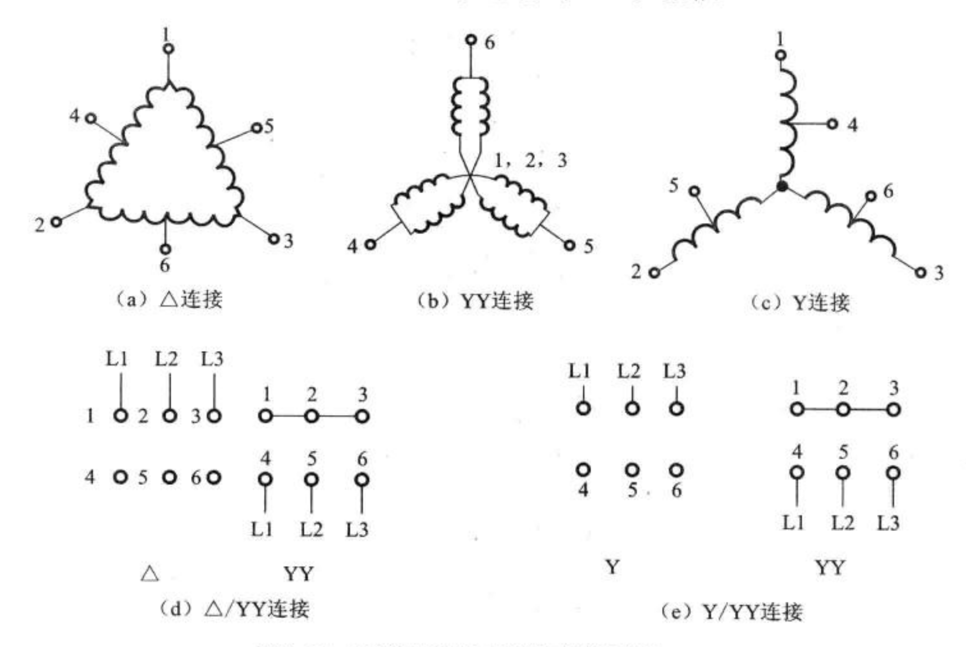


图 4-24 双速电动机三相定子绕组接法

△形电路中，每相绕组由两个线圈串联而成，电动机呈 4 极($p=2$)旋转磁场；YY 形电路中，每相绕组由两个线圈并联而成，产生 2 极($p=1$)旋转磁场。



因此，若将定子绕组接成△形，则得到低速；接成YY形，则得到高速，且高速是低速的两倍。这两种接法的功率近似相等，属恒功率调速，它适用于一般金属切削机床等需要恒功率调速的机械设备。

2. Y/YY接法

Y/YY接法如图4-24(b)、(c)、(e)所示。它由Y形(4极、低速)改为YY形(2极、高速)时，属于恒转矩调速，它适用于起重机、电梯、皮带运输机等恒转矩负载的拖动。

4.6.2 双速电动机的控制电路

图4-25所示为△/YY接法的双速电动机控制电路图。

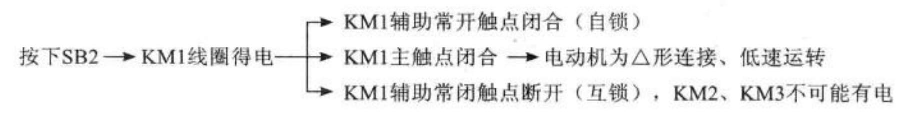
1. 主电路分析

主电路中KM1主触点闭合时，定子绕组接成△形，电动机低速运转；KM3、KM2主触点闭合，则接成YY形，电动机高速运转。

2. 控制电路分析

图4-25所示的电路图中给出了三种双速电动机高、低速控制方案。图4-25(a)所示为采用复合按钮SB2、SB3来实现高、低速切换的控制电路，这种控制方式适用于小容量的双速电动机，其工作过程如下。

低速运转控制：



高速运转控制：

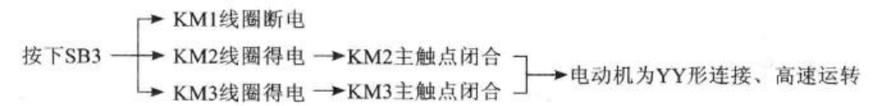


图4-25(b)是用选择开关SA实现高、低速控制。高/低转换过程中，需重新按起动按钮SB2。这种控制方式同样适用于功率较小的电动机。

图4-25(c)所示为采用选择开关SA与时间继电器组合来进行变速控制。SA具有三个接点，当将SA扳到中间位置时，电动机断电停转；当将SA置于“低速”位置时，KM1线圈得电，电动机低速运转；当将SA置于“高速”位置时，为限制起动电流，电动机首先以低速运转，经过时间继电器KT延时后，自动切换到高速运行。因为当电动机容量较大时，如果直接高速起动运转，则起动电流较大，因此，这种变速方案适用于较大容量的双速电动机。

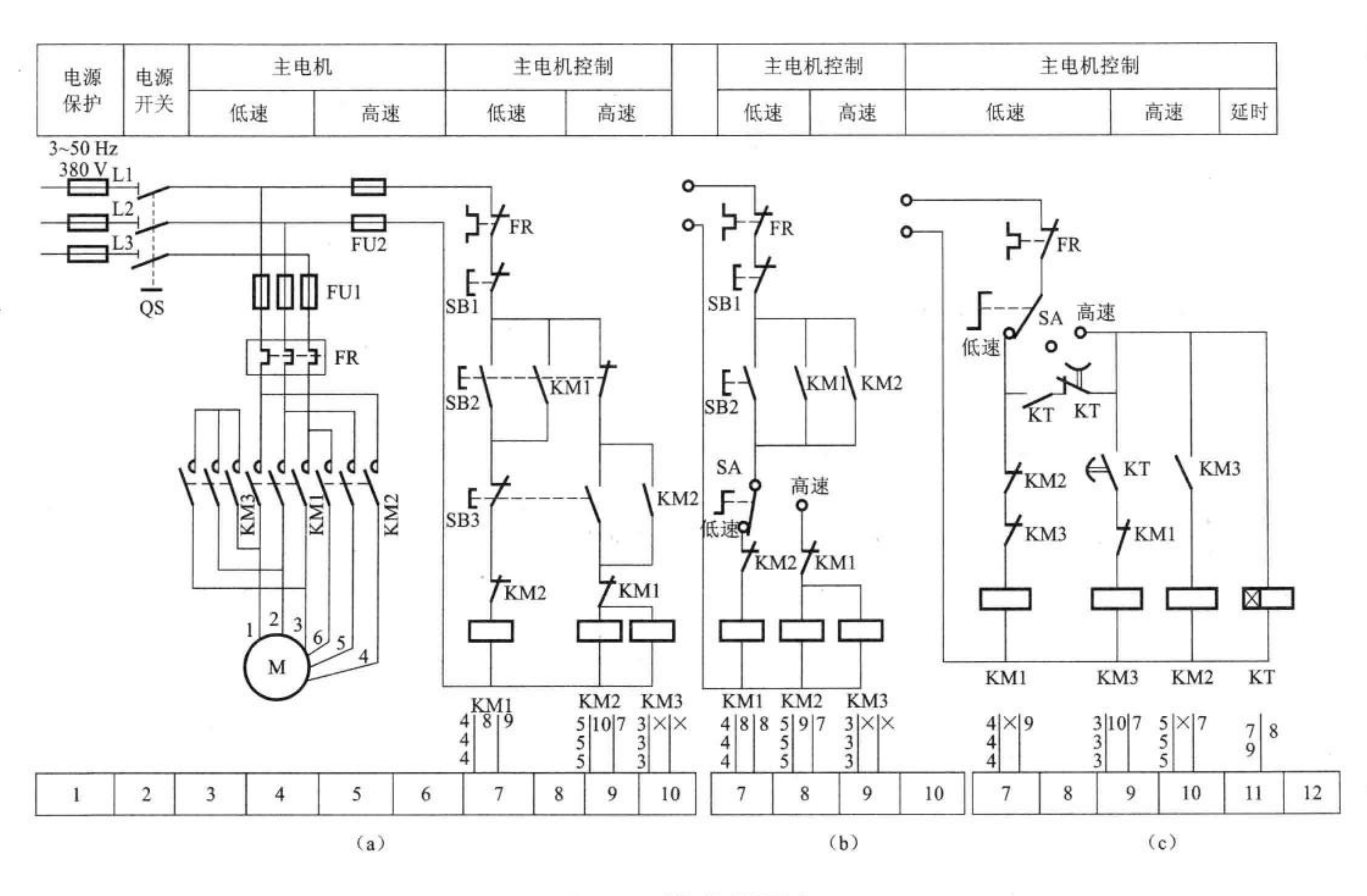


图4-25 双速电动机控制电路

高速起动过程如下。



思考与练习

1. 什么叫自锁、互锁？各有什么作用？

2. 怎样实现自锁、互锁、顺序起停和多地点起停？

3. 为什么要进行降压起动？有哪几种常用方法？

4. 电动机正反向运行时，为什么一定要设置互锁环节？

5. 电动机制动主要有哪几种方法？

6. 试根据电磁制动器线圈断电抱闸的原理图，设计电磁制动器线圈通电抱闸的原理图。

7. 试设计一台电动机在正反转运行时均能实现能耗制动的电气控制原理图。

8. 试设计一台电动机在正反转运行时均能实现反接制动的电气控制原理图。

9. 设计一台设备的电气控制原理图，满足以下要求：

(1) 该设备由三台三相笼型感应电动机 M1、M2 和 M3 拖动；

(2) 起动时，按照 M1、M2 和 M3 的顺序起动；

(3) 停止时，按照相反的顺序停止；

(4) 上述动作均要求一定的时间间隔；

(5) 设置短路和过载保护。

10. 某机床的主轴和润滑泵分别由三相笼型感应电动机 M1 和 M2 拖动，设计其电气控制原理图，满足以下要求：

(1) 润滑泵必须先起动，才能起动主轴，但可同时停止；

(2) 主轴具有正反向运行和点动控制;

(3) 设置短路和过载保护。

11. 一台小车由三相笼型感应电动机 M 拖动,试设计其电气控制原理图,要求如下:

(1) 从原位开始前进,到终点后自动停止;

(2) 在终点停留一段时间后,自动起动,后退到原位后自动停止;

(3) 在前进和后退过程中,通过按钮能立即向相反方向运动;

(4) 小车在前进或后退过程中的任意位置均可停止或起动;

(5) 设置限位、短路和过载保护。

12. 一台设备由两个运动部件 A 和 B 构成所需的运动,两个运动部件分别由三相笼型感应电动机 M1 和 M2 拖动,试设计其电气控制原理图,要求如下:

(1) 按下起动按钮,A 从位置 1 起动,到位置 2 停止;

(2) 然后,B 从位置 3 起动,到位置 4 停止;

(3) 然后,A 从位置 2 起动,回到位置 1 停止;

(4) 最后,B 从位置 4 起动,回到位置 3 停止;

(5) 设置短路和过载保护。

13. 托盘由一台电动机驱动,试设计其电气控制原理图,要求如下:

(1) 按下起动按钮,托盘由原地 A 起动,前进到 B 点碰到行程开关 SQ2 后停止;

(2) 过一段时间后,按下返回按钮,才能从 B 点起动,后退碰到原位行程开关 SQ1 后停止,即回到原地 A 点;

(3) 托盘在前进或后退过程中可在中间任意位置停止;

(4) 托盘停在中间任意位置,按下复位按钮,能够回到原地;

(5) 设置短路和过载保护。

第5章 典型设备电气控制电路分析

实际生产中所用的机械设备很多,虽然设备功能、工作方式或电气控制电路各不相同,但都是建立在常用低压电器和继电器接触器基本控制电路基础之上。本章通过分析几种典型机械设备电气控制系统的实例,使读者掌握分析电气控制系统的基本方法,培养阅读电气控制图的能力,加深读者对机械设备中的机械、液压与电气控制紧密配合的理解,为实际从事机械设备电气控制系统的设计和应用打下基础。

5.1 概　　述

首先要对设备整体系统有所了解,明确设备系统的工作要求,分析电气控制系统的组成与功能。设备整体系统分析可从以下四个方面入手。

1. 机械设备概况分析

通过阅读机械设备的有关技术资料,了解设备的基本结构及工作原理、设备的传动系统类型及拖动方式、主要技术性能指标和运动要求等。不同的设备和工作条件对电气系统控制功能的需求不同,因此,电气系统的组成结构也不同。

2. 电气设备及电气元件选用状况分析

电气元件是构成电气设备的基础器件,电气设备的功能需要通过组合各种具有特定功能的电气元件来实现。在设备控制系统分析中,需要明确电动机的作用、型号规格以及控制要求;需要了解控制类电气元件的使用情况,如按钮、转换开关、行程开关等发出主令信号的元件,接触器、时间继电器等各种继电器类的控制元件;还需要了解各种电气执行元件的使用情况,如电磁换向阀、电磁离合器等;对于变压器、熔断器等保证系统正常工作的其他电气元件均需关注。

3. 机械设备中电气元件的连接关系分析

在了解机械设备所采用电气元件的基础上，还应明确电气元件之间的连接关系，即信息采集、传递和输出的形式和方法。设备状态信息是通过开关元件获取的，如设备上的各种操作手柄、撞块、挡铁触发开关元件，各种现场检测装置以及人工触发主令电器，都能获得控制信息。发出的信号再通过线路传递到电气控制系统中，因此对应连接关系必须明确。输出方面是指电气控制系统中的执行元件将驱动力输送到机械设备的相应位置，并实现设备要求的各种动作。

4. 电气控制系统分析

掌握了设备及电气控制系统的基本情况后，即可对设备电气控制系统进行具体的分析。通常将控制电路进行划分，形成简单明了的由少数简单控制功能组合的局部电路，这样便于对电路进行分析。在电路划分时，可依据拖动形式，将电路初步划分为电动机、液压或气压传动控制电路；根据被控电动机的台数，将电动机控制电路再加以划分，使每台电动机的控制电路成为一个局部电路；对控制要求复杂的电路，也可以进一步细分，使每一个基本控制电路或若干个基本控制电路成为一个局部分析电路单元。经过“化整为零”，逐步分析每一个局部电路的工作原理以及各部分之间的控制关系之后，还必须用“集零为整”的方法，统观整个电路的保护环节以及电气原理图中其他辅助电路（如检测、信号指示、照明等电路）。检查整个控制线路，看是否有遗漏，特别要从整体角度去进一步检查和理解各控制环节之间的联系，理解电路中每个元件所起的作用。

机械设备电气控制系统的分析步骤如下。

1）设备运动分析

设备运动分析包括设备结构特点分析，工作要求分析等。

2）拖动系统分析

拖动系统分析是指电动机主电路、液压或气压传动电路的分析。该分析是要确定动力电路中所用电气元件的数目、接线状况及控制要求；确定执行元件的设置及动作要求，如交流接触器主触点、各组主触点分断或闭合的动作要求、限流电阻的接入和短接、液压或气压系统中电磁阀的数目与控制要求等。

3）控制电路分析

可以通过采用电器顺序动作描述法，或使用逻辑函数表达式的分析方法，分析控制电路的组成、工作原理以及各种控制功能的实现过程。

金属切削机床是进行机械加工的主要设备，它用去除材料的方法将金属毛坯加工成具有一定形状、尺寸和表面粗糙度的机械零件。常见的通用机床采用

典型的电气控制系统，即继电器接触器控制系统，例如车床、铣床、组合机床等。本章以几种机床为例，阐述电气控制系统的分析方法。

金属切削机床的运动可分为三种：对工件进行切削的运动称为主运动（一般为机床主轴的旋转运动）；持续地把工件的被切削部位投入切削的运动称为进给运动（即加工工具与工件之间的相对运动）；其他运动（如机床部件的位置调整运动）统称为辅助运动。

5.2 普通车床电气控制系统分析

卧式车床是机械加工中应用最广泛的一种机床，它的用途很广，能完成多种回转表面类零件的车削加工，例如轴类、套筒类和盘类零件，可以车削出内外圆柱面、圆锥面、环槽及成形回转面、常用螺纹及端面等，因此卧式车床的运动特征为主轴带动工件旋转，形成切削主运动，刀架移动形成进给运动。由于不同型号的卧式车床加工零件的尺寸不同，拖动电动机的工作要求不同，因而控制电路也有所不同。由于卧式车床运动形式简单，采用机械调速，因此相应的控制电路也不复杂。本节以一中型卧式车床电气控制电路为例，阐述普通车床电气系统的组成结构与工作原理以及进行电气系统分析的过程和方法。

5.2.1 车床的主要结构和工作要求

卧式车床的结构原理示意图如图 5-1 所示。它主要由床身、主轴、主轴变速箱、尾座、进给箱、丝杠、光杠、拖板和刀架等组成。普通车床车削加工的主运动是主轴通过卡盘带动工件的旋转运动，进给运动是由丝杠带动拖板和刀架作纵、横两个方向的运动，主运动与进给运动均由主电动机拖动，主电动机的动力经主轴箱、进给箱以及光杠或丝杠，传到拖板等机械传动部分，然后分别传送到主轴和刀架。

卧式车床属于中型车床，可加工的最大工件回转直径为 1020 mm，最大工件长度为 3000 mm。由于加工的工件尺寸较大，加工时转动惯量也比较大，为提高工作效率，需要配备停机制动功能。为防止加工时刀具和工件温度过高，机床配备有冷却泵及冷却泵电动机。为减轻工人的劳动强度以及减少辅助工时，要求拖板能够带动刀架快速移动。

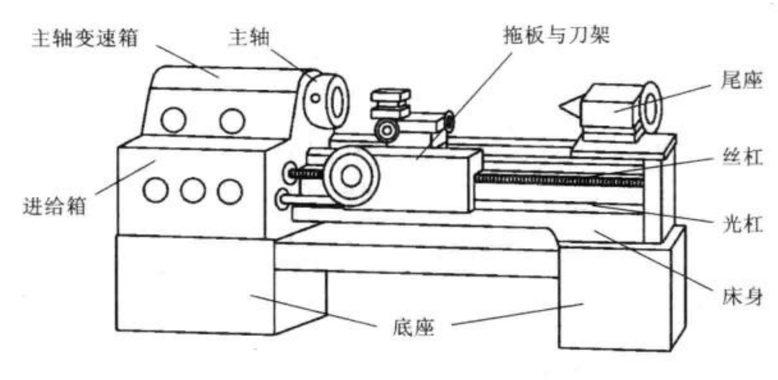


图 5-1 卧式车床外形

5.2.2 电气拖动及控制要求

卧式车床上配置有三台三相笼型感应电动机，分别为主电动机 M1、冷却泵电动机 M2 和驱动刀架快速移动的电动机 M3。电动机的控制要求如下。

1. 主电动机的控制要求

主电动机 M1 提供主轴运动和进给运动的动力。要求主电动机能够直接起动，还能够正、反两个方向旋转，并可对正、反两个旋转方向进行停机电气制动。为方便加工和调整机床，还需要有点动功能。

2. 冷却泵电动机的控制要求

机床加工时，冷却泵电动机 M2 带动冷却泵工作，以提供冷却液。M2 采用直接起动，且为连续工作。

3. 快速移动电动机的控制要求

快速移动电动机 M3 用于带动拖板，以带动刀架快速移动。在工作过程中，快速移动电动机起调整作用，根据使用情况，可随时对它进行手动起停控制。

5.2.3 车床电气控制系统分析

卧式车床的电气控制系统电路图如图 5-2 所示，图中所用的电气元件符号与功能说明如表 5-1 所示。

下面根据“化整为零”的原则对卧式车床的主电路以及控制电路进行分析。

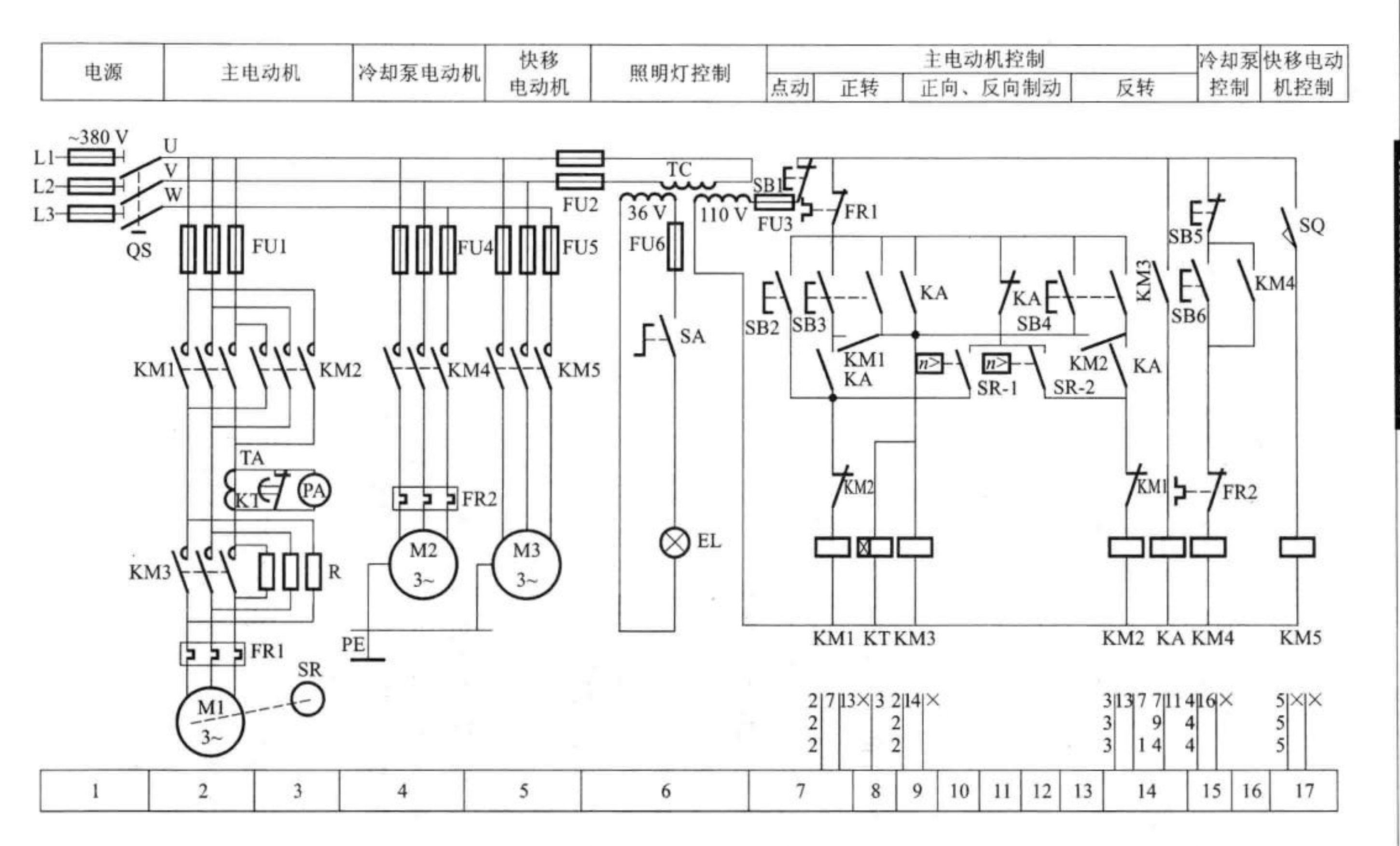


图5-2 卧式车床电气控制电路

表 5-1 电气元件符号及功能说明

符号	名称及用途	符号	名称及用途
M1	主电动机	SB1	总停按钮
M2	冷却泵电动机	SB2	主电动机正向点动按钮
M3	快速移动电动机	SB3	主电动机正转按钮
KM1	主电动机正转接触器	SB4	主电动机反转按钮
KM2	主电动机反转接触器	SB5	冷却泵电动机停止按钮
KM3	短接限流电阻接触器	SB6	冷却泵电动机起动按钮
KM4	冷却泵电动机起动接触器	TC	控制变压器
KM5	快速移动电动机起动接触器	FU1～FU6	熔断器
KA	中间继电器	FR1	主电动机过载保护热继电器
KT	通电延时时间继电器	FR2	冷却泵电动机过载保护热继电器
SQ	快速移动电动机点动行程开关	R	限流电阻
SA	照明灯开关	EL	照明灯
SR	速度继电器	TA	电流互感器
PA	电流表	QS	隔离开关

1. 主电路分析

车床采用三相 380 V 交流电源供电，由隔离开关 QS 引入，主电路中包含三台电动机的驱动电路。主电动机 Ml 电路分为三部分，第一部分为交流接触器 KM1、KM2 的主触点，分别控制主电动机 Ml 的正转和反转；第二部分为交流接触器 KM3 的主触点，控制限流电阻 R 的接入与切除，在主轴点动调整时，R 的串入可限制起动电流，在停机制动过程中，R 的串入可限制反接制动电流；第三部分为 Ml 定子绕组电流的监视电路，电流表 PA 接入电流互感器 TA 回路，监测主电路的电流大小，为防止主电动机起动时电流过大，对电流表造成冲击，在电路中设置了时间继电器 KT 进行保护，当主电动机正向或反向起动时，KT 线圈通电，当延时时间未到时，电流表 PA 被 KT 延时断开常闭触点短接，延时结束才会有电流通过电流表 PA。速度继电器 SR 与主电动机的输出轴相连，在反接制动时依靠它及时切断反相序电源。

冷却泵电动机 M2 的起动与停止由接触器 KM4 的主触点控制，快速移动电动机 M3 的起动与停止由接触器 KM5 控制。

为保护主电路，分别由熔断器 FUl、FU4 和 FU5 对电动机 Ml、M2 及 M3 实现短路保护，由热继电器 FRl 和 FR2 分别对 Ml 和 M2 进行过载保护，快速



移动电动机 M3 只是短时工作,所以不需要过载保护。

2. 控制电路分析

由图 5-2 所示的控制电路可知,控制电路中电气元件较多,因此采用控制变压器 TC 与电网进行电隔离,以提高操作和维修时的安全性。控制电路的电压为交流 110 V,由控制变压器 TC 提供,采用 FU3 做短路保护。控制电路可划分为主电动机 M1 控制、冷却泵电动机 M2 控制以及快移电动机 M3 控制等 3 个控制电路。主电动机 M1 控制电路较复杂,可进一步划分为点动、起动和正反转控制以及反接制动控制等几部分,具体划分如图 5-3 所示,下面对各局部控制电路逐一进行分析。

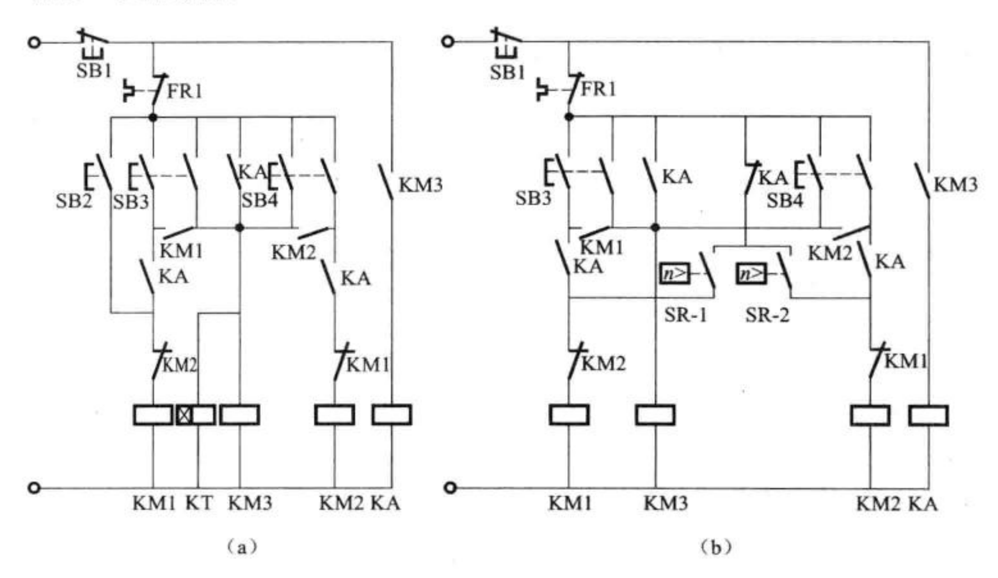


图 5-3 主电动机 M1 基本控制电路

1) 主电动机的点动控制

由图 5-3(a)可知主电动机 M1 的点动工作过程如下。

按下SB2 ⟶ KM1线圈得电 ⟶ KM1主触点闭合 ⟶ 电流经R流入主电机 ⟶ M1起动

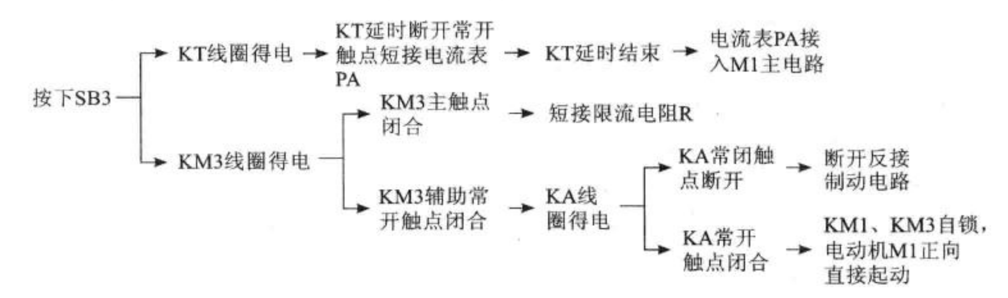
松开SB2 ⟶ KM1线圈断电 ⟶ 主电动机M1停转

在按下 SB2 的过程中,由于 KM3 线圈未得电,其辅助常开触点不闭合,中间继电器 KA 线圈断电,虽然 KM1 的辅助常开触点已闭合,但不自锁,所以 SB2 属于点动按钮。电阻 R 的接入可以限制电动机 M1 的点动电流,从而降低点动转速。

2）主电动机的起动与正反转控制

车床主轴的正反转是通过主电动机的正反转来实现的，主电动机 M1 的额定功率为 30 kW，车削加工时消耗功率较大，而起动时负载很小，因此起动电流并不很大，在非频繁点动的一般情况下，仍可采用全压直接起动。

图 5-3(a)所示的控制电路中，主电动机 M1 的正向起动过程如下。



在电动机 M1 的起动过程中，使用 KT 的通电延时断开常闭触点将电流互感器 TA 短路，以免起动电流过大时冲击损坏电流表 PA。

SB4 为反向起动按钮，反向直接起动过程同正向类似，不再赘述。

3）主电动机的反接制动控制

图 5-3(b)所示的主电动机反接制动控制电路中，车床停车时实现反接制动，用速度继电器 SR 检测和控制。当主电动机 M1 正转运行时，速度继电器 SR 的常开触点 SR-2 闭合，SR-2 连接的 KA 常闭触点断开。

当按下总停按钮 SB1 后，原来通电的 KM1、KM3、KT 和 KA 线圈全部断电，相关的所有触点均释放或复位。当松开 SB1 后，由于惯性的原因，主电动机仍然高速正向旋转，SR 的常开触点 SR-2 继续保持闭合状态，KA 常闭触点复位闭合，使反转接触器 KM2 线圈立即通电，其电流通路是：SB1→FR1→KA 常闭触点→SR-2→KM1 常闭触点→KM2 线圈。因此主电动机 M1 开始反接制动，反向电磁转矩将抗衡正向惯性转动转矩，电动机正向转速很快降下来，当转速低于 100 r/min 时，SR-2 常开触点复位断开，从而切断了 KM2 线圈通路，至此正向反接制动结束。反转时的反接制动过程与上述过程类似，只是在此过程中起作用的为速度继电器的 SR-1 常开触点。

反接制动过程中，由于 KM3 线圈未得电，因此限流电阻 R 被接入主电动机主电路，以限制反接制动电流。

通过对主电动机控制电路的分析，可看到中间继电器 KA 在电路中起着扩展接触器 KM3 触点数量的作用，并在制动控制电路中起着电子开关的作用。

4）冷却泵电动机的控制



图 5-2 所示的冷却泵电动机 M2 的控制电路为典型的直接起动控制。控制电路中起动和停止按钮分别为 SB6 和 SB5，由它们控制接触器 KM4 线圈的得电与断电，从而实现对冷却泵电动机 M2 的长动控制。

5）刀架的快速移动

图 5-2 所示的刀架快速移动是通过操作控制手柄压动行程开关 SQ，使 SQ 常开触点闭合，控制接触器 KM5 线圈通电，KM5 主触点闭合，快速移动电动机 M3 起动运转，其输出动力经传动系统最终驱动拖板带动刀架作快速移动。当控制手柄复位时，SQ 常开触点复位断开，KM5 断电，M3 立即停转，控制电路为典型的无自锁结构点动控制。

此外，由图 5-2 所示的车床电气控制电路图可知，控制变压器 TC 的二次侧还有一路电压为 36 V（安全电压），提供给车床照明。当开关 SA 闭合时，照明灯 EL 点亮；开关 SA 断开时，EL 就熄灭。

5.3 卧式铣床电气控制系统分析

铣削是一种刀具高速旋转、工件作进给运动以实现切削加工的加工方式。铣床的种类很多，有卧铣、立铣、龙门铣、仿形铣以及各种专用铣床等，现以应用广泛的卧式万能升降台铣床为例，分析中小型铣床的控制电路。

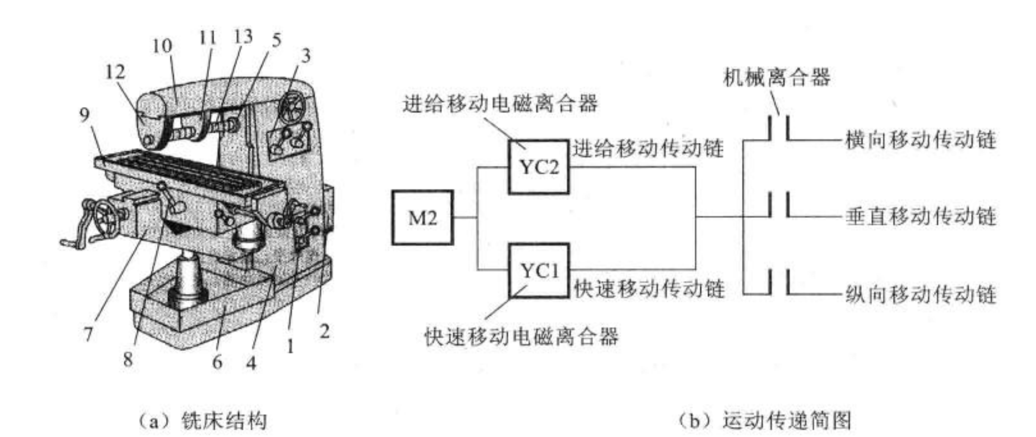
卧式万能升降台铣床可用来加工平面、斜面和沟槽等，装上分度头后，还可以铣切直齿齿轮和螺旋面，装上圆形工作台后还可以铣切凸轮和弧形槽等，是一种常用的通用机床。

5.3.1 铣床的主要结构和运动形式

卧式万能铣床具有主轴转速高、调速范围宽、操作方便和加工范围广等特点，机床结构主要由床身、立柱、主轴、悬梁、刀杆、水平工作台以及底座等部分组成，其结构简图如图 5-4(a)所示。

铣床床身内装有主轴的传动机构和变速操纵机构，前支撑用来支撑刀杆的前端，刀杆另一端则固定在主轴上，在刀杆上安装铣刀，由主轴带动铣刀旋转形成切削主运动，铣刀可作正反两个方向的转动。

铣床床身的前侧面装有垂直导轨，升降台可沿导轨上下移动。在升降台上



(a) 铣床结构　　(b) 运动传递简图

图 5-4　铣床结构及运动简图

1—立柱；2—主电动机；3—主传动；4—进给传动；5—铣刀主轴；6—底座；7—升降台；8—操作手柄；9—水平工作台；10—悬梁；11—中间支撑；12—前支撑；13—刀杆

面安装有水平工作台，可以平行于主轴轴线方向移动（横向移动，即左右移动）和垂直于轴线方向移动（纵向移动，即前后移动），并可随升降台上下移动，因此水平工作台具有上下、左右及前后 3 坐标 6 个方向上的进给运动或位置调整。水平工作台上还可安装圆工作台，圆工作台旋转进给使铣床可进行圆弧铣削加工。

由于铣床切削主运动同工作台的进给运动之间无速度比例协调的要求，因此铣床主运动由主电动机 M1 提供动力，进给运动由进给电动机 M2 提供动力。

进给电动机经进给移动、传动链传动，通过相应的机械离合器，在选定的进给方向上驱动工作台移动进给；当经快速移动传动链传动时，则在选定的方向上工作台快速移动。进给运动及快速移动的传递示意图如图 5-4(b)所示。

5.3.2　电气拖动及控制要求

上述卧式万能升降台铣床上配置有三台三相笼型感应电动机，分别为驱动主轴旋转的主电动机 M1、驱动工作台移动的进给电动机 M2 和驱动冷却泵供液的电动机 M3。电动机的控制要求如下。

1. 主电动机 M1 的控制要求

主电动机 M1 空载时直接起动；需要带动铣刀的主轴正转和反转；为提高工作效率，要求有停车制动控制；为操作安全和方便，换刀时主轴必须处于制动状态；主电动机可在两处进行起停控制；为保证变速时齿轮易于啮合，要求主电动机有瞬时点动控制功能。



2. 进给电动机 M2 的控制要求

工作台进给电动机 M2 直接起动；为满足纵向、横向以及垂直方向的往返运动，要求进给电动机能够正转和反转；为提高生产率，空行程时可以手动控制快速移动；进给变速时，也需要瞬时点动控制。从设备使用安全方面考虑，为防止各进给运动之间的运动干涉，必须具有互锁控制，并由手柄操作机械离合器来选择进给运动的方向。

3. 冷却泵电动机 M3 的控制要求

电动机 M3 拖动冷却泵，在铣削加工时提供切削液，起动后可持续工作。

4. 主轴电动机 M1 与进给电动机 M2 的起、停顺序要求

铣床在加工零件时，为保证设备安全，要求主轴电动机起动以后，进给电动机才能起动工作。

5.3.3 铣床电气控制系统分析

图 5-5 所示的是卧式万能升降台铣床的电气控制系统原理图，电路图中所用电气元件及功能说明如表 5-2 所示。

表 5-2 电气元件符号及功能说明

符号	名称及用途	符号	名称及用途
M1	主电动机	SA4	照明灯开关
M2	进给电动机	SA5	主轴换向开关
M3	冷却电动机	QS	电源隔离开关
KM1	主电动机起动接触器	SB1、SB2	主电停止按钮
KM2	进给电动机正转接触器	SB3、SB4	主轴起动按钮
KM3	进给电动机反转接触器	SB5、SB6	工作台快速移动按钮
KM4	快速移动控制接触器	FR1	主电动机热继电器
SQ1	工作台向右进给行程开关	FR2	进给电动机热继电器
SQ2	工作台向左进给行程开关	FR3	冷却泵电动机热继电器
SQ3	工作台向前、向下进给行程开关	FU1～FU8	熔断器
SQ4	工作台向后、向上进给行程开关	TC	控制变压器
SQ6	进给变速瞬时点动开关	VC	整流器
SQ7	主轴变速瞬时点动开关	YB	主轴制动电磁制动器
SA1	工作台转换开关	YC1	电磁离合器(快移传动链)
SA2	主轴换刀制动开关	YC2	电磁离合器(进给传动链)
SA3	冷却泵电动机开关		

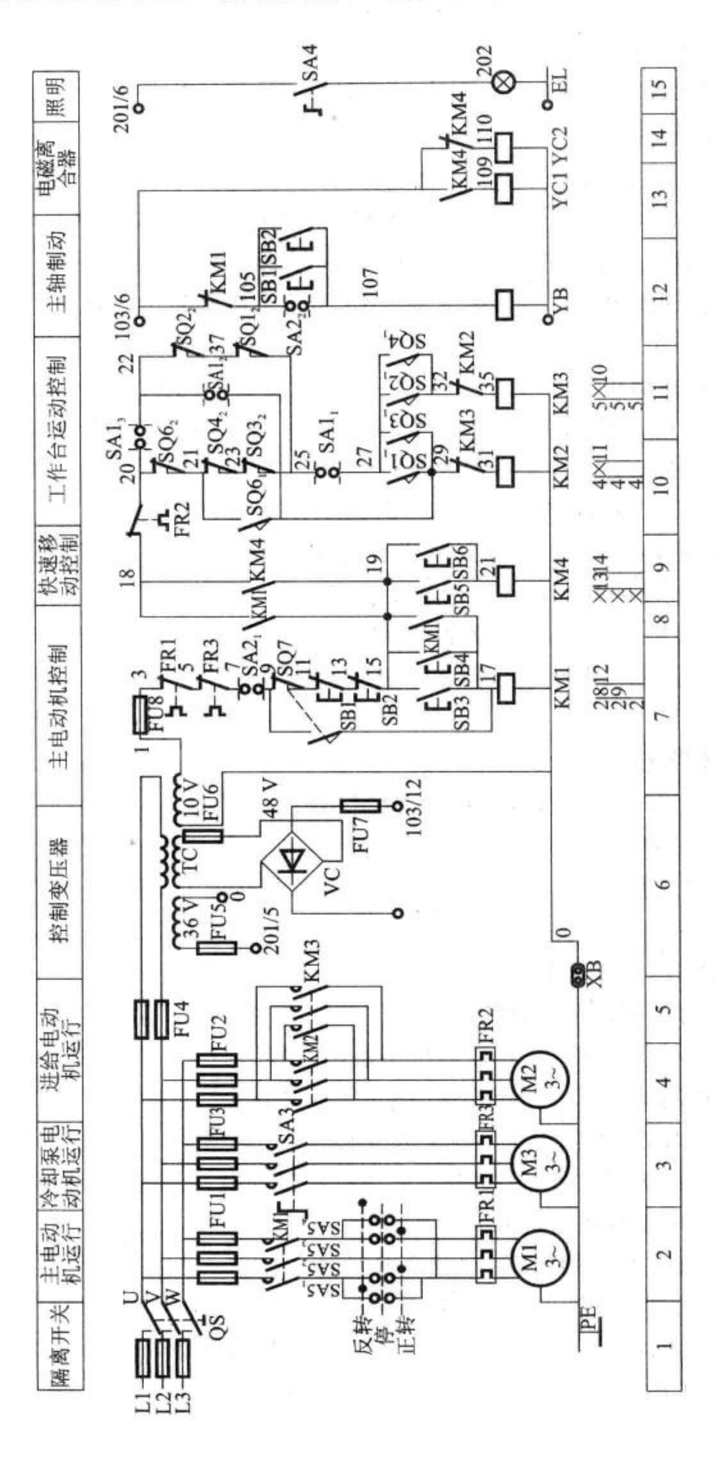


图5-5 卧式万能升降台铣床电气控制系统电路



由图 5-5 可知，该铣床控制线路可分为主电路、控制电路和照明电路三部分，下面依据“化整为零”的思路，对电气控制系统进行具体分析。

1. 主电路分析

图 5-5 所示的主电路中共有三台电动机。M1 为主电动机，其正反转通过转换开关 SA5 手动切换，交流接触器 KM1 的主触点只控制电源的接入与断开。由于大多数情况下一批或多批工件只用一种铣削方式，并不需要经常改变电动机的转向，因此可用手动转换开关 SA5 实现主电动机的正反转控制，以简化控制电路。在主电动机运转前，需选择好转向，为安全起见，在主电动机运转过程中，不允许手动切换方向。

M2 为进给电动机，由于需要频繁变换转动方向，因而用接触器 KM2 和 KM3 的主触点构成正转与反转主电路。

M3 为冷却泵电动机，铣削加工时，根据工件材料，为延长刀具的使用寿命和提高加工质量，需要对工件和刀具进行冷却润滑。因此，主电路中采用转换开关 SA3 直接控制冷却泵电动机的起动和停止。

同样为了保护主电路，由熔断器 FU1、FU2 和 FU3 分别对电动机 M1、M2 和 M3 实现短路保护，由热继电器 FR1、FR2 和 FR3 分别对 M1、M2 和 M3 进行过载保护。

2. 控制电路分析

控制电路所需交、直流电源分别由控制变压器 TC 的二次绕组提供，短路保护分别由 FU6、FU7 和 FU8 实现。控制电路主要包括主电动机 M1 和进给电动机 M2 的控制，由于 M1 和 M2 的控制电路均较为复杂，因此还需进一步划分，下面对各局部控制电路进行分析。

1）主电动机 M1 的控制

（1）主电动机 M1 的起动控制

主电动机 M1 起动前，需要根据所用铣削方式，由组合开关 SA5 选定电动机的转向，将控制电路中的选择开关 SA2 扳到主电动机正常工作的位置，此时 $SA2_1$ 触点闭合，$SA2_2$ 触点断开。为了方便操作，采用两处起停控制，因此当按下起动按钮 SB3 或 SB4 时，可接通主电动机起停控制接触器 KM1 的线圈，其主触点闭合，主电动机按给定方向起动旋转。

（2）主电动机 M1 的停车制动及换刀制动

为减小切削过程对铣刀转速的影响，主轴上装有飞轮以增大转动惯量。因此为了缩短停车时间，要求主电动机停车时须有制动控制，该控制电路采用电磁制动器 YB 对主轴进行停车制动。停车时，按下按钮 SB1 或 SB2，其常闭触点

断开使接触器KM1线圈失电，KM1主触点断开，切断电动机定子绕组电源；同时SB1或SB2常开触点闭合，接通电磁制动器YB的线圈，使得制动器中的闸瓦迅速抱住闸轮，主轴电动机立即停止运转。在主轴停车后，可松开按钮SB1或SB2。

当进行换刀和装刀操作时，为了防止主轴转动造成意外事故，也为了方便装刀，主轴也须处于断电停车和制动的状态。此时可将选择开关SA2由工作状态位置扳到装刀制动状态的位置，即$SA2_1$触点断开，切断接触器KM1的线圈电路，使主电动机不能起动；$SA2_2$触点闭合，从而接通电磁制动器YB的线圈电路，使主轴处于制动状态不能转动，保证装刀和换刀工作的顺利进行以及人身安全。

（3）主轴变速时的瞬时点动

铣床主轴的变速由机械系统完成。在设置齿轮传动比的过程中，当选定啮合的齿轮未能进入正常啮合时，要求电动机能点动至合适的位置，保证齿轮正常啮合。主轴变速的具体控制过程如下。

主轴变速时，先将变速手柄拉出，已啮合的齿轮脱离，然后转动变速手柄选择转速，转速选定后将变速手柄推回原位，使改变了传动比的齿轮重新啮合。由于两啮合齿轮齿与齿之间的位置不一定能刚好对上，因而造成啮合困难。当齿轮没有进入正常啮合状态时，需要主轴有瞬时点动的功能，以调整两个啮合齿轮的相对位置，使齿轮能正常啮合。实现瞬时点动是由变速手柄与行程开关SQ7共同控制的。当变速手柄推回原位时，在推进的过程中会压动行程开关SQ7，SQ7的常闭触点先断开，切断KM1线圈电路的自锁回路；SQ7的常开触点闭合，使接触器KM1线圈得电，主电动机M1转动。变速手柄回到原位后，行程开关SQ7被释放，因此主电动机M1断电。此时并未采取制动措施，仅依靠瞬时点动使主电动机M1产生一个冲击齿轮系统的力，使齿轮系统微动，以保证齿轮的顺利啮合。

在变速操作时，需要注意的是变速手柄复位要求迅速且连续，一次不到位应立即拉出，以免行程开关SQ7没能及时松开，致使主电动机的转速上升，从而导致在齿轮未啮合好的情况下损坏齿轮。一次瞬时点动不能实现齿轮良好的啮合时，应立即拉出复位手柄，重新进行复位瞬时点动的操作，直至完全复位且齿轮正常啮合工作为止。

2）进给电动机M2的控制

（1）顺序控制

为防止刀具和机床的损坏，在加工时，要求只有主轴旋转后，才允许有进给运动。由图5-5可知，控制主电动机的交流接触器KM1辅助常开触点被串入



工作台的运动控制电路中，这样可保证只有在主轴旋转后工作台才能进给的联锁要求。

（2）水平工作台的运动控制

如图 5-6 所示，水平工作台的移动方向由各自的操作手柄来选择。一般卧式铣床工作台有两个操作手柄，一个为纵向（左、右）操作手柄，有右、中、左 3 个位置；另一个为横向（前、后）和垂直（上、下）十字复合操作手柄，该手柄有 5 个位置，即上、下、前、后和中间位置。

图 5-5 所示的 SA1 为工作台转换开关，它是一种二位式选择开关，当使用水平工作台时，触点 $SA1_1$ 和 $SA1_3$ 闭合，触点 $SA1_2$ 断开；当使用圆形工作台时，触点 $SA1_2$ 闭合，触点 $SA1_1$ 和 $SA1_3$ 断开。两种工作台的控制电路如图 5-7 所示。

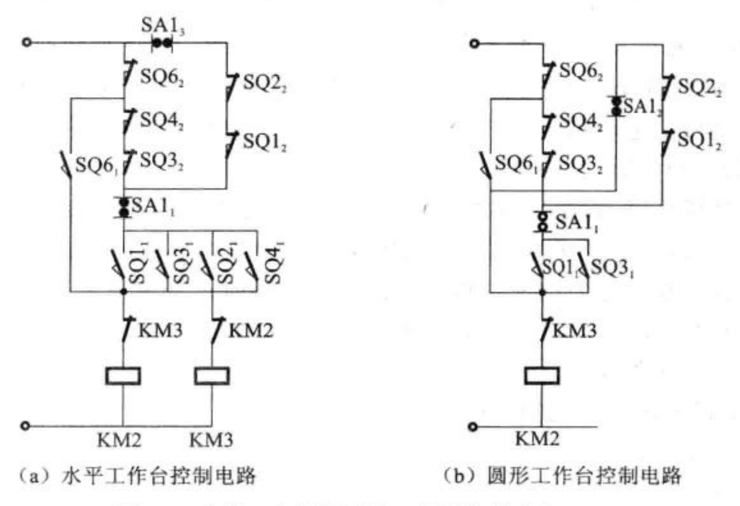


（a）纵向进给手柄　　（b）十字复合手柄

图 5-6　水平工作台操作手柄示意图

① 水平工作台纵向进给运动的控制

水平工作台的局部控制电路如图 5-7(a)所示。由于此时工作台转换开关 SA1 置于水平工作台位置，因此 $SA1_1$ 与 $SA1_3$ 触点闭合，$SA1_2$ 触点断开。



（a）水平工作台控制电路　　（b）圆形工作台控制电路

图 5-7　水平工作台和圆形工作台控制电路

水平工作台的纵向进给运动由纵向操作手柄与行程开关 SQ1 和 SQ2 联合控制。主电动机起动后，若要工作台向右进给，需将纵向手柄扳向右，此时通过联动机构将纵向进给离合器合上，接通纵向进给运动的机械传动链；同时纵向手柄压动行程开关 SQ1，使 SQ1 常开触点 $SQ1_1$ 闭合，常闭触点 $SQ1_2$ 断开，接通进给电动机 M2 正转接触器 KM2 线圈电路，KM2 的主触点闭合，M2 正转，驱动工作台向右移动进给。KM2 线圈通电的电流回路从 KM1 辅助常开触点开始，电流经 FR2→$SQ6_2$→$SQ4_2$→$SQ3_2$→$SA1_1$→$SQ1_1$→KM3 辅助常闭触点到 KM2 线圈。从该电流回路中可知，如果操作者误将十字复合手柄扳向工作位置，则 $SQ4_2$ 和 $SQ3_2$ 中必有一个断开，使 KM2 线圈无法通电，这样就可实现工作台左、右移动同前、后及上、下移动之间的联锁控制。水平工作台向左移动进给时，电路原理与向右时相似，不再赘述。

如将纵向手柄扳到中间位时，纵向机械离合器脱开，行程开关 SQ1 和 SQ2 不受压(复位)，KM2 和 KM3 接触器的线圈断电，因此进给电动机 M2 也断电，工作台停止移动。

工作台的左右终端安装有限位撞块，若工作台运行到达终点位，纵向手柄就会被撞块撞到中间停车位置，使 SQ1 或 SQ2 复位，从而使 KM2 或 KM3 线圈断电，进给电动机 M2 停转，从而实现限位保护。

② 水平工作台横向和垂直进给运动控制

水平工作台横向和垂直进给运动的选择和互锁通过十字复合手柄和行程开关 SQ3 及 SQ4 联合控制，该十字复合手柄有上、下、前、后四个工作位置和一个中间不工作位置。当操作手柄向下或向前扳动时，通过联动机构将控制垂直或横向运动方向的机械离合器合上，可接通该运动方向的机械传动链。同时压动行程开关 SQ3，使 SQ3 常开触点 $SQ3_1$ 闭合，常闭触点 $SQ3_2$ 断开，于是接通进给电动机 M2 正转接触器 KM2 线圈电路，KM2 的主触点闭合，进给电动机 M2 正转，从而驱动工作台向下或向前移动进给。KM2 线圈通电的电流通路仍从 KM1 辅助常开触点开始，电流经 FR2→$SA1_3$→$SQ2_2$→$SQ1_2$→$SA1_1$→$SQ3_1$→KM3 辅助常闭触点到 KM2 线圈。上述电流通路中的常闭触点 $SQ2_2$ 和 $SQ1_2$ 用于工作台前、后及上、下移动与左、右移动之间的互锁控制。

当十字复合操作手柄向上或向后扳动时，将压动行程开关 SQ4，使得控制进给电动机 M2 反转的接触器 KM3 线圈得电，M2 反转，驱动工作台向上或向后移动进给。其互锁控制原理与向下或向前移动控制类似。

当十字复合操作手柄扳在中间位置时，横向或垂直方向的机械离合器分离，行程开关 SQ3 和 SQ4 均不受压，KM2 和 KM3 的线圈均不通电，因此进给电动机 M2 停转，工作台也停止移动。在床身上同样也设置了上、下和前、后限位保护用的终端撞块，如果工作台移动到极限位置，撞块就会撞击十字手柄，使



其回到中间位置，从而控制电路切断 M2 的主电路，使工作台在限位点停车。

③ 水平工作台进给运动的互锁控制

在同一时间内，工作台只允许一个方向移动，为防止机床运动干涉造成设备事故，各运动方向之间必须进行互锁。而操作手柄在工作时，只存在一种运动选择，因此铣床进给运动之间的互锁由两操作手柄之间的互锁来实现。

互锁控制电路由两条电路并联组成，一条是由纵向操作手柄控制的行程开关 SQ1 和 SQ2 的常闭触点组成的串联支路，另一条是由十字复合操作手柄控制的行程开关 SQ3 和 SQ4 的常闭触点组成的串联支路。当需要进行纵向进给运动时，需将纵向操作手柄扳向相应的工作位置，纵向操作手柄会压 SQ1 或 SQ2，使 SQ1 和 SQ2 常闭触点所在的串联支路断路；此时十字复合手柄须处于中间位置（不压 SQ3 和 SQ4），以使 KM2 或 KM3 线圈通电的另一条串联支路能正常通电，以完成相应方向的纵向进给运动。若在纵向进给运动的过程中，误操作扳动十字复合手柄，则压动 SQ3 或 SQ4，使常闭触点 $SQ3_2$ 或 $SQ4_2$ 断开，触点 $SQ3_2$ 和 $SQ4_2$ 组成的串联支路断路，则接触器 KM2 或 KM3 立即断电，工作台停止移动，从而对设备进行误操作保护。

④ 水平工作台的快速移动

在进行对刀时，为了缩短对刀时间，要求水平工作台不做铣削加工，并能快速移动。由图 5-4(b)所示的运动传递简图可知，在进给方向选定后，水平工作台作快速移动还是进给运动，取决于电磁离合器 YC1 和 YC2 线圈的得电与断电。快速移动为手动控制，在主电动机起动后，按下起动按钮 SB5 或 SB6，接触器 KM4 便以"点动方式"通电。KM4 辅助常闭触点断开，进给电磁离合器 YC2 线圈失电，断开进给移动传动链；KM4 辅助常开触点闭合，使快移电磁离合器 YC1 线圈得电，接通快速移动传动链，水平工作台沿给定的进给方向快速移动。当进入铣削区时，松开按钮 SB5 或 SB6，KM4 线圈失电，其辅助常闭触点复位，接通进给传动链，水平工作台就在原方向按进给工作状态继续移动。

工作台调整时，主轴不旋转，同样可以在机械离合器选定的方向进行快速移动。

⑤ 水平工作台变速时的瞬时点动

与主轴变速类似，水平工作台变速同样由机械系统完成，为了变速时齿轮易于啮合，在进给电动机 M2 的控制电路中，也设置了瞬时点动控制环节。变速操作应在工作台停止移动时进行。具体的操作过程是：在主电动机 M1 起动以后，拉出水平工作台变速手柄并转动至所需要的进给速度，再将手柄推回原位。该变速手柄在复位的过程中，瞬时点动地压动行程开关 SQ6，使得 $SQ6_2$ 断开、$SQ6_1$ 闭合，短时接通 KM2 的线圈电路，使进给电动机 M2 瞬时点动。KM2 线圈通电的电流回路为从 KM1 辅助常开触点开始，电流经 FR2→$SA1_3$→$SQ2_2$

→$SQ1_2$→$SQ3_2$→$SQ4_2$→$SQ6_1$→KM3 辅助常闭触点到 KM2 线圈。由此可见，若纵向操作手柄和十字操作手柄中有一个不在中间停止位置，此电流通路便被切断。变速手柄复位后，行程开关 SQ6 因未受压而复位。与主轴瞬时点动操作相同，电动机 M2 的点动也要求变速手柄复位时迅速且连续，一次不到位，应立即拉出变速手柄，再重复瞬时点动的操作，直到齿轮处于良好啮合状态。

(3) 圆形工作台的控制

为了扩大铣床的加工能力，还可在水平工作台上安装圆形工作台。圆形工作台是可使装夹工件作回转运动的工作台，以实现圆弧的铣削加工。圆形工作台工作时，要求水平工作台进给系统停止工作，即水平工作台的两个操作手柄均扳在中间停止位置，只允许圆形工作台绕轴心转动。

当工件在圆形工作台上安装好以后，用快速移动方法将工件和铣刀之间的位置调整好，扳动工作台转换开关 SA1，使其位于圆形工作台"接通"位置。此时触点 $SA1_2$ 闭合，触点 $SA1_1$ 与 $SA1_3$ 断开。圆形工作台局部控制电路如图 5-7(b)所示。

由于工作台转换开关 SA1 的触点 $SA1_2$ 是闭合的，在主电动机 M1 起动后就接通接触器 KM2 的线圈电路，其主触点闭合，进给电动机 M2 正转，拖动圆形工作台转动，该铣床中圆形工作台只能单方向旋转。KM2 线圈通电的电流路径为：KM1 辅助常开触点→FR2→$SQ6_2$→$SQ4_2$→$SQ3_2$→$SQ1_2$→$SQ2_2$→$SA1_2$→KM3 辅助常闭触点→KM2 线圈。由上述电流路径可见，圆形工作台的控制电路中，串联了水平工作台的四个工作行程开关 SQ1～SQ4 的四个常闭触点，因此水平工作台任一操作手柄只要扳到工作位置，都会压下相应的行程开关，从而切断圆形工作台的控制电路，使其立即停止转动，从而实现水平工作台进给运动和圆形工作台转动之间的互锁保护控制。

该卧式铣床的局部照明由控制变压器 TC 供给 36 V 安全电压，灯开关为 SA4，FU5 实现照明电路的短路保护。

5.4 组合机床电气控制系统分析

组合机床是根据特定工件的加工工艺要求而设计制造的一种高效率自动化专用加工设备。常采用多刀(多轴)、多面、多工位同时进行钻、扩、铰、镗、铣等加工工作，并且具有自动工作循环的功能，在机械制造业批量产品的生产中



得到了广泛应用。

组合机床通常由具有一定功能的通用部件（如动力部件、支撑部件、输送部件等）和加工专用部件（如夹具、多轴箱等）组成，其中动力部件是组合机床通用部件中最主要的一类部件。常见的动力部件有动力头和动力滑台，在动力头上只安装多轴箱，而滑台上还可安装由各种切削头组成的动力头，因此动力滑台比动力头通用性更强。动力部件常采用电动机拖动或液压系统拖动，由电气控制系统实现自动循环控制，是典型的机电或机电液一体化的自动化加工设备。

各标准通用动力部件的控制电路是独立完整的。当一台组合机床由多个动力部件组合构成时，该机床的控制电路即由各动力部件各自的控制电路通过一定的连接电路组合而成。对于控制多动力部件构成的组合机床，通常有如下三方面的要求：

① 动力部件的点动及复位控制；

② 动力部件的单机自动循环控制（也称半自动循环控制）；

③ 整机全自动循环控制。

下面以双面粗铣组合机床为例，分析这类机床的控制电路。

5.4.1 组合机床的结构及运动

双面粗铣组合机床是在工件两相对表面上进行铣削的一种高效自动化专用加工设备，可用于对铸件、钢件及有色金属件相对平行的两个大平面进行铣削，一般用于柴油机和拖拉机等行业箱体类零件加工，双面粗铣组合机床结构示意图如图 5-8 所示。两个动力滑台相对布置并安装在底座上，左、右铣削动力头固定在滑台上，中间的工作台是用于完成铣削的通用进给动力部件，与铣削头配套，再配以各种夹具，选择合理的刀具和切削参数即可进行大走刀强力平面铣削。

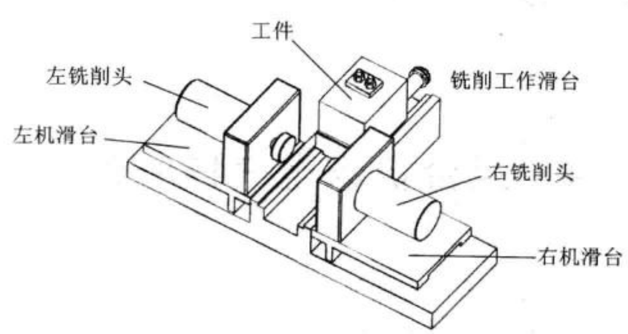
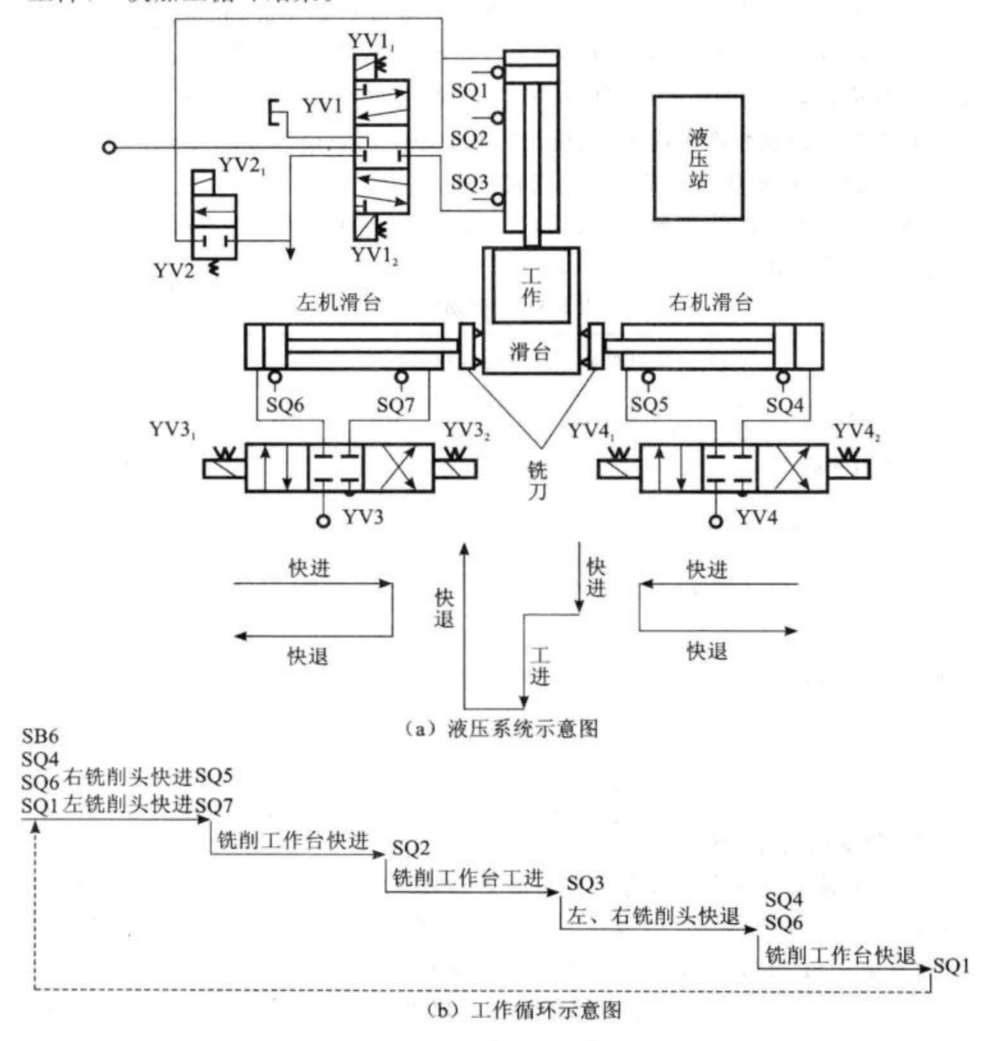


图 5-8 双面粗铣组合机床结构示意图

双面粗铣组合机床的控制过程是典型的顺序控制，铣削工作滑台及左、右动力滑台的液压系统示意图和工作循环图如图 5-9 所示。工作时先将工件装入夹具定位，夹紧后，按下起动按钮 SB6，机床工作的自动循环过程开始。首先左右动力滑台同时快进，此时刀具电动机也起动工作，两滑台运动至行程终端时停下；接着铣削工作台快进、工进；铣削完毕后，左右动力滑台快速退回原位，到达原位后刀具电动机停止转动；铣削工作台快速退回原位；最后松开夹具，取出工件，一次加工循环结束。



（a）液压系统示意图

（b）工作循环示意图

图 5-9　机床液压系统和工作循环示意图



5.4.2 组合机床的拖动及控制要求

双面粗铣组合机床采用电动机和液压系统相结合的拖动方式，驱动系统的控制要求分别分析如下。

1. 液压驱动系统分析

机床的左右动力滑台和铣削工作滑台均由液压系统驱动。由图 5-9 可知，左右动力滑台的快进和快退动作分别由各自的液压缸来完成，并由两个三位四通电磁换向阀分别对两个方向的运动进行切换，其中电磁阀线圈 $YV3_1$ 与 $YV3_2$ 控制左缸换向，电磁阀线圈 $YV4_1$ 与 $YV4_2$ 控制右缸换向。铣削工作滑台快进、工进和快退的控制原理在前面已分析过，该液压缸由电磁阀线圈 $YV1_1$ 与 $YV2_1$ 控制快进和工进，电磁阀线圈 $YV1_2$ 控制快退。

各工步的电磁阀线圈通电状态如表 5-3 所示，表中 M2、M3 分别为左机和右机的刀具电动机。

表 5-3 电器动作

工 步	电磁换向阀线圈通电状态							电动机运行		转换主令
	$YV1_1$	$YV1_2$	$YV2_1$	$YV3_1$	$YV3_2$	$YV4_1$	$YV4_2$	M2	M3	
左右滑台快进				+			+	+	+	SB6
铣削工作台快进	+		+					+	+	SQ5、SQ7
铣削工作台工进	+							+	+	SQ2
左右滑台快退					+	+		+	+	SQ3
铣削工作台快退		+								SQ4、SQ6
停止										SQ1
备注	铣削工作台			左机滑台		右机滑台		刀具电动机		

2. 电动机驱动分析

双面粗铣组合机床配置有三台三相交流感应电动机，其中 M1 为液压泵电动机，要求首先直接起动，当液压系统供油正常后，其他控制电路才能通电工作；刀具电动机 M2、M3 在滑台进给循环开始后起动，滑台退回原位时停机。

图 5-10、图 5-11 所示的主电路中，M1、M2 和 M3 三台电动机均为直接起动和单向旋转，分别由交流接触器 KM1、KM2 和 KM3 的主触点控制其定子绕组的通电与断电。FR1～FR3 分别对三台电动机进行过载保护，FU1～FU3 分别

对三台电动机进行短路保护。

5.4.3 组合机床控制电路分析

双面粗铣组合机床的电气控制原理图如图 5-10、图 5-11 所示，电路图中所用电气元件及功能说明如表 5-4 所示。

表 5-4 电气元件符号及功能说明

符　号	名称及用途	符　号	名称及用途
M1	油泵电动机	SA6	左机滑台工作方式选择开关
M2	左机刀具电动机	SA7	右机滑台工作方式选择开关
M3	右机刀具电动机	QS	电源隔离开关
KM1	油泵电动机起动接触器	SB1	总停按钮(急停按钮)
KM2	左机刀具电动机起动接触器	SB2	油泵电动机起动按钮
KM3	右机刀具电动机起动接触器	SB4、SB3	刀具电动机起、停按钮
KA1～KA10	中间继电器	SB6、SB5	液压系统循环工作起、停按钮
SQ1、SQ2、SQ3	铣削工作台行程开关	SB7、SB11	左机滑台点动向前和复位按钮
SQ4、SQ5	右机滑台行程开关	SB8、SB12	右机滑台点动向前和复位按钮
SQ6、SQ7	左机滑台行程开关	SB9、SB10	铣削工作台点动向前和复位按钮
SA1～SA2	电动机解除选择开关	FR1～FR3	热继电器
SA3	铣削工作台工作方式选择开关	FU1～FU6	熔断器
SA4	左机滑台解除选择开关	TC	控制变压器
SA5	右机滑台解除选择开关	VC	整流器

控制电路包含交流电路部分和直流电路部分。交、直流电源分别由控制变压器 TC 二次绕组提供，交流电路部分用于对三台电动机进行控制，直流电路部分用于对液压系统进行控制，控制电路的短路保护分别由 FU5 和 FU6 来实现。

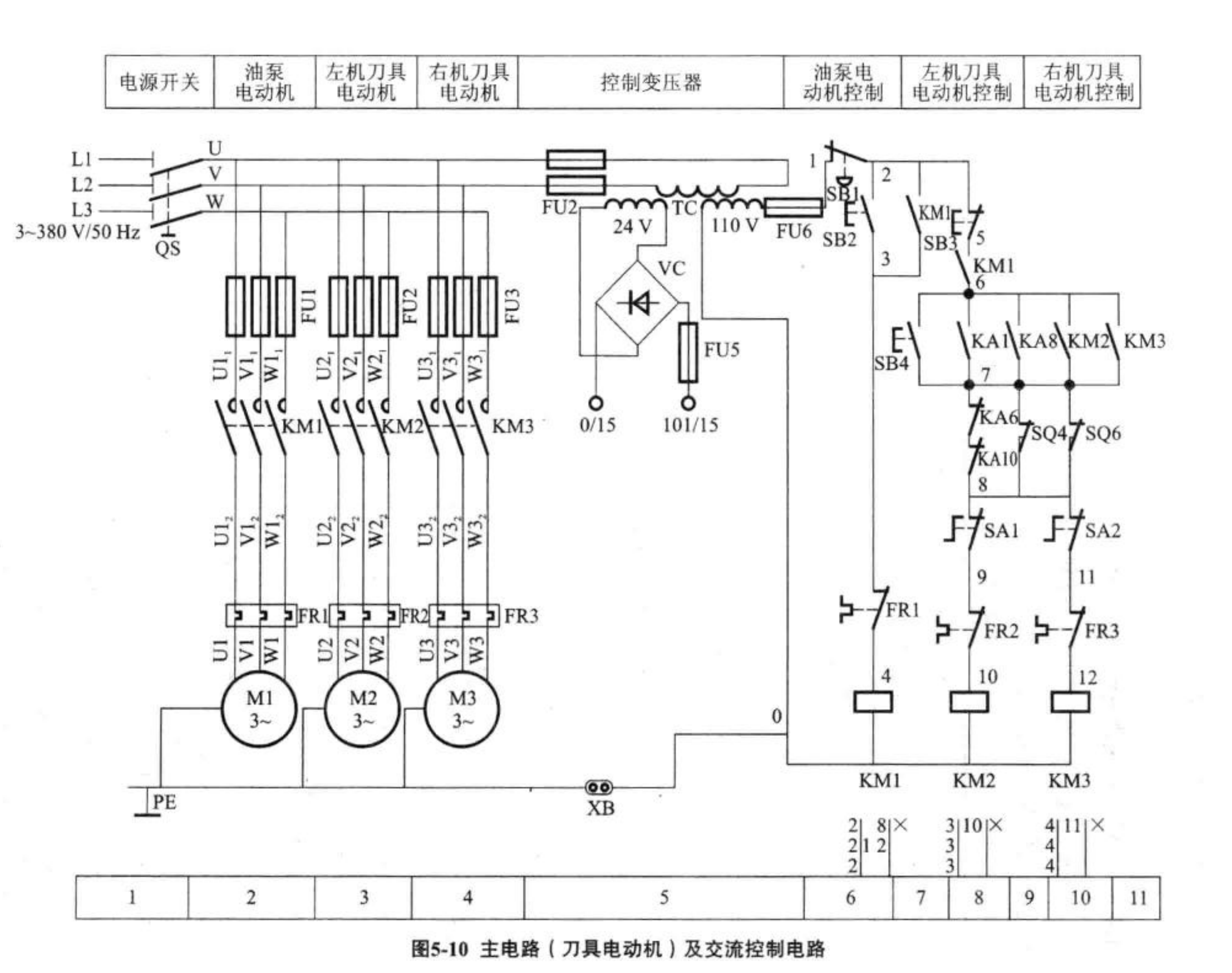


图5-10 主电路（刀具电动机）及交流控制电路

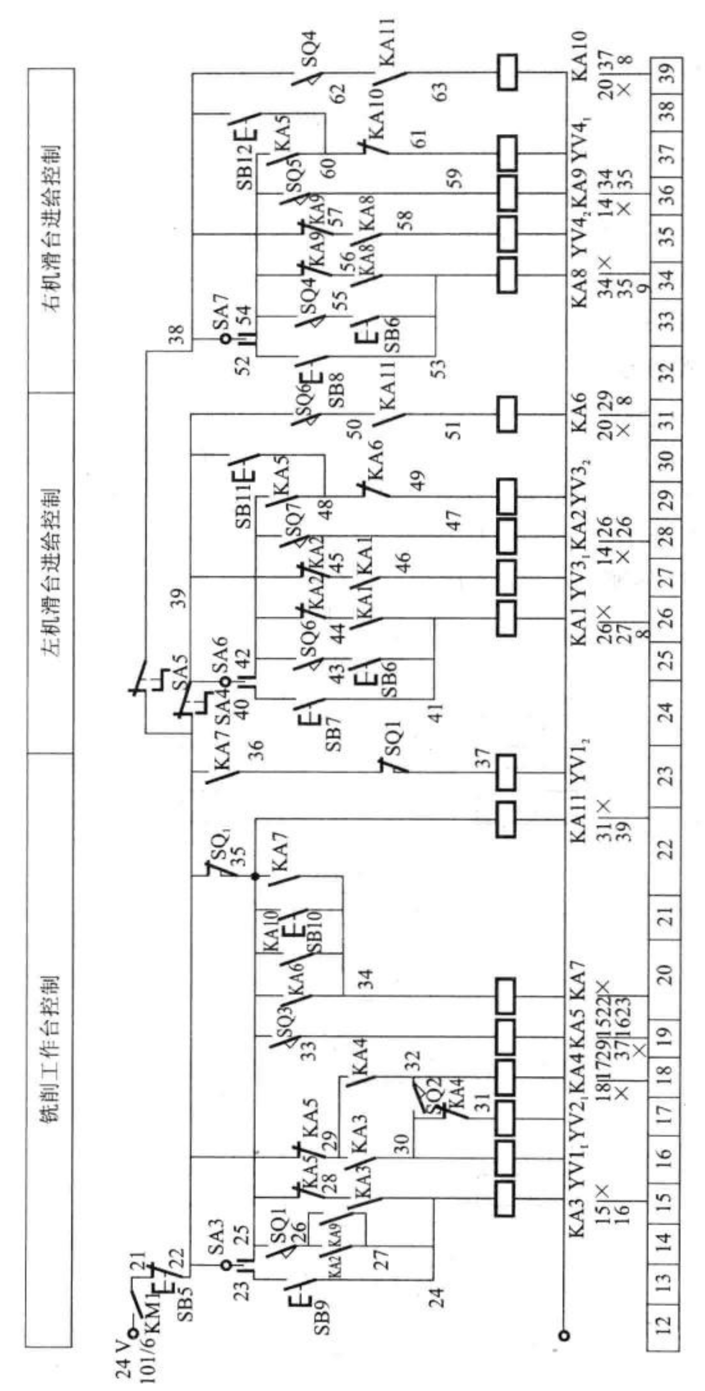


图5-11 液压系统直流控制电路

1. 交流控制电路

交流控制局部电路如图 5-10 所示，其中 SB1 为总停按钮，SB2 为油泵电动机起动按钮。当按下 SB2 时，油泵电动机的接触器 KM1 得电，其主触点闭合，M1 起动。KM1 的辅助常开触点闭合，接通刀具电动机和液压系统的控制电路，满足机床进入加工工作循环的条件。左机刀具电动机 M2 和右机刀具电动机 M3 在加工的自动循环过程中，由中间继电器及行程开关控制起停；在调整时，由按钮 SB4、SB3 手动控制起停。选择开关 SA1、SA2 将刀具电动机 M2、M3 从工作循环中解除，这样便于运动部件的分别调整。

2. 直流控制电路

直流控制局部电路如图 5-11 所示，主要用于控制液压系统，实现运动的自动循环。直流控制局部电路包括铣削工作台、左机滑台及右机滑台控制 3 部分，可实现整机自动循环、单机半自动循环和点动调整与复位控制。

图 5-12 所示为组合机床自动循环工作流程图。开始全自动工作循环时，要求接触器 KM1 的辅助常开触点闭合；左、右机滑台在原位并分别压下原位行程

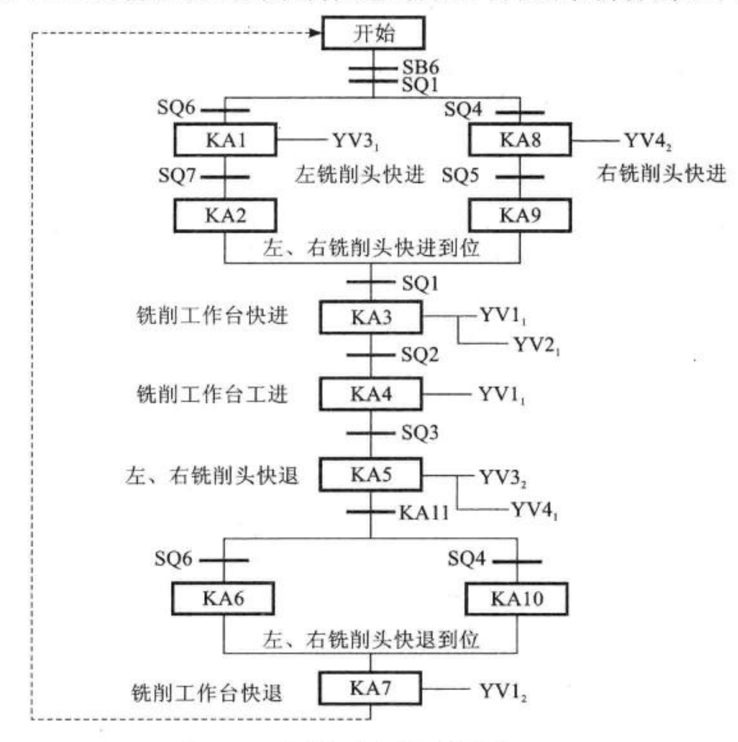
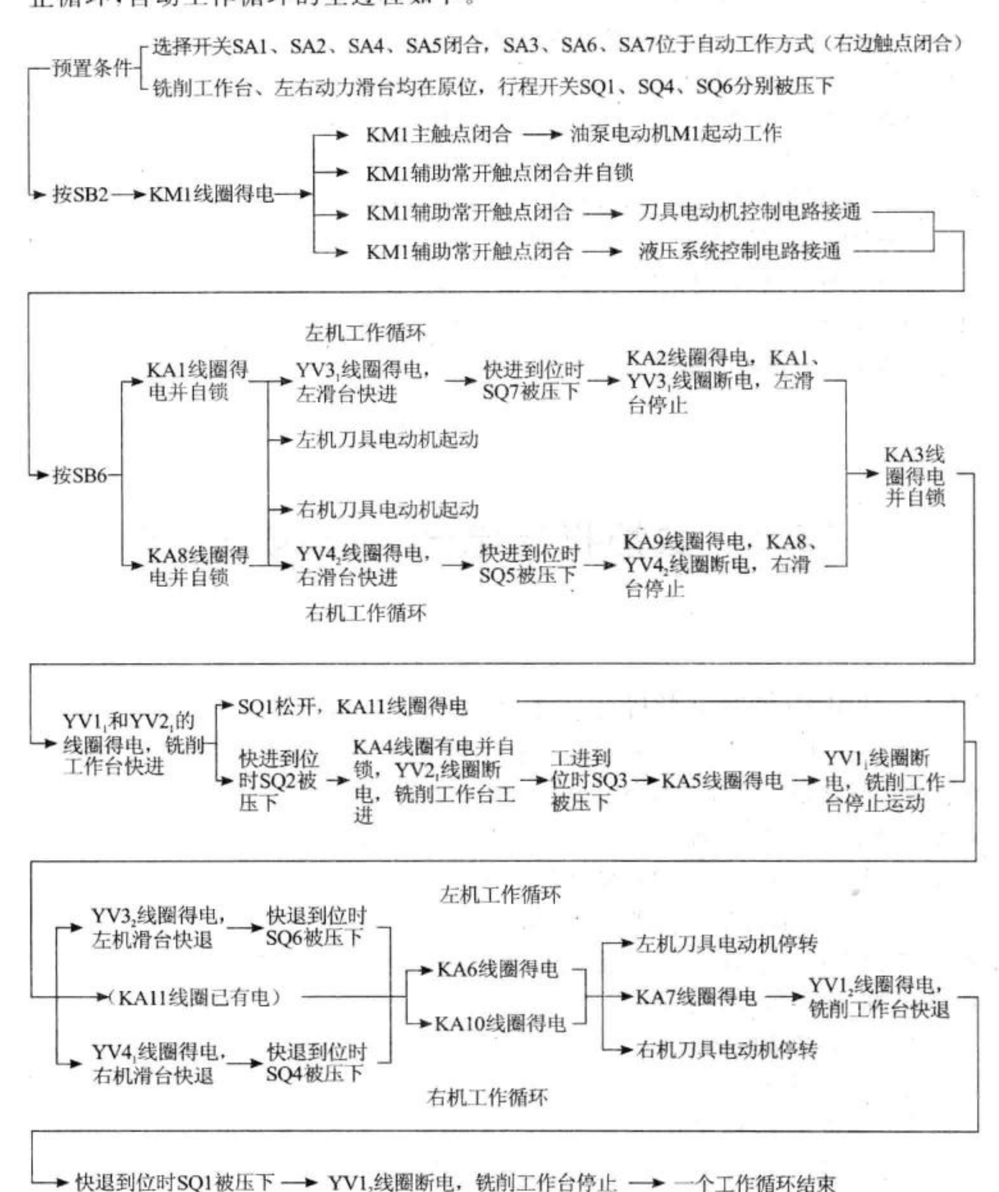


图 5-12　组合机床主要动作顺序

开关 SQ6、SQ4；铣削工作台在原位并压下行程开关 SQ1。以上条件满足时，按下起动工作循环的按钮 SB6，即可开始自动加工工作循环过程，按钮 SB5 可终止循环，自动工作循环的全过程如下。





转换开关 SA4 或 SA5 可以将左机滑台或右机滑台从整机循环中解除，从而实现单独循环。当 SA4 触点闭合、SA5 触点断开时，右机滑台从整机循环工作中解除，此时按下起动循环按钮 SB6，左机滑台单独循环工作；当 SA5 触点闭合、SA4 触点断开时，左机滑台从整机循环中解除，此时按下起动循环按钮 SB6，右机滑台单独循环工作。

选择开关 SA3、SA6 与 SA7 分别用来选择铣削工作台、左机与右机滑台的工作方式，扳到手动位置时，可通过点动按钮 SB9、SB7、SB8 分别控制铣削工作台、左机与右机滑台向前点动；扳到自动位置时，可通过复位按钮 $SB1_0$、$SB1_1$ 及 $SB1_2$ 分别使它们快速退回原位。

由此分析可见，双面粗铣组合机床的控制过程是典型的顺序控制，输入/输出均为开关量。实际生产中可用 PLC 控制系统取代继电器控制系统，方便、高效地适应更复杂的控制需求。

5.5 数控机床电气控制线路分析

5.5.1 TK1640 型卧式数控车床主要结构及运动形式

TK1640 型卧式数控车床采用主轴变频调速、三挡无级变速和 HNC-21T 车床数控系统，机床为两轴联动，配有四工位刀架，可满足不同需要的加工。具有可开闭的半防护门，确保操作人员的安全。机床适于多品种、中小批量产品的加工，对复杂、高精度零件更显出其优越性。

TK1640 型数控车床的结构简图如图 5-13 所示，由底座、床身、主轴箱、大拖板(纵向拖板)、中拖板(横向拖板)、电动刀架、尾座、防护罩、电气系统、CNC 系统、冷却、润滑等部分组成。

机床主轴的旋转运动由 5.5 kW 变频电动机经皮带传动至 I 轴，经三联齿轮变速将运动传至主轴 II，并得到低速、中速和高速三段范围内的无级变速；Z 坐标为大拖板左、右运动方向，即纵向，该运动由一交流永磁伺服电动机与滚珠丝杠直连实现；X 坐标为中拖板前后运动方向，其运动由另一交流永磁伺服电动机通过同步齿形带及带轮带动滚珠丝杠和螺母实现。中拖板的 X 向运动机构安装在 Z 向运动的大拖板上。

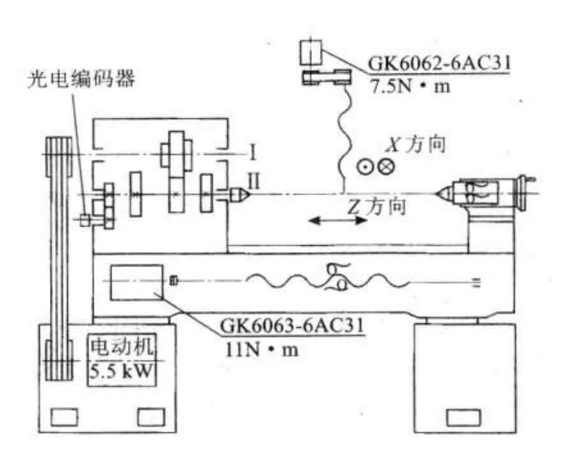


图 5-13 TK1640 型数控车床的结构简图

为保证主轴转一圈，刀架移动一个导程，在主轴箱的左侧安装了一个光电编码器。主轴至光电编码器的齿轮传动比为 1∶1。光电编码器配合纵向进给交流伺服电动机，保证主轴转一圈，刀架移动一个导程(即加工螺纹导程)。

5.5.2 TK1640 型卧式数控车床电气控制电路分析

电气控制的主要器件如表 5-5 所示。

表 5-5 TK1640 型数控车床主要电气元件

序号	名 称	主 要 用 途
1	数控装置	控制系统
2	软驱单元	数据交换
3	控制变压器	伺服控制电源、交流接触器电源、照明灯电源、开关电源等
4	伺服变压器	伺服电源
5	开关电源	给系统供电
6	伺服驱动器	X、Z 轴电动机伺服驱动器
7	伺服电动机	X 轴进给电动机
8	伺服电动机	Z 轴进给电动机
9	交流感应电动机	主轴运动
10	变频器	主轴电动机无级调速

1．机床的运动及控制要求

TK1640 型数控车床主轴的旋转运动由 5.5 kW 变频主轴电动机提供动力，与机械变速配合得到低速、中速和高速三段范围的无级变速；Z 轴、X 轴的运动由交流伺服电动机带动滚珠丝杠实现，两轴的联动由数控系统控制；加工螺纹由光电编码器与交流伺服电动机配合实现；除上述运动外，还有电动刀架的转位、冷却电动机的起动及停止等。

2．主电路分析

TK1640 型数控车床主电路如图 5-14 所示。图中的 QFl 为电源总开关，QF3、QF2、QF4、QF5 分别为主轴强电、伺服强电、冷却电动机、刀架电动机的空气开关，它们的作用是接通电源及短路、过载和欠压时起保护作用；其中QF4、

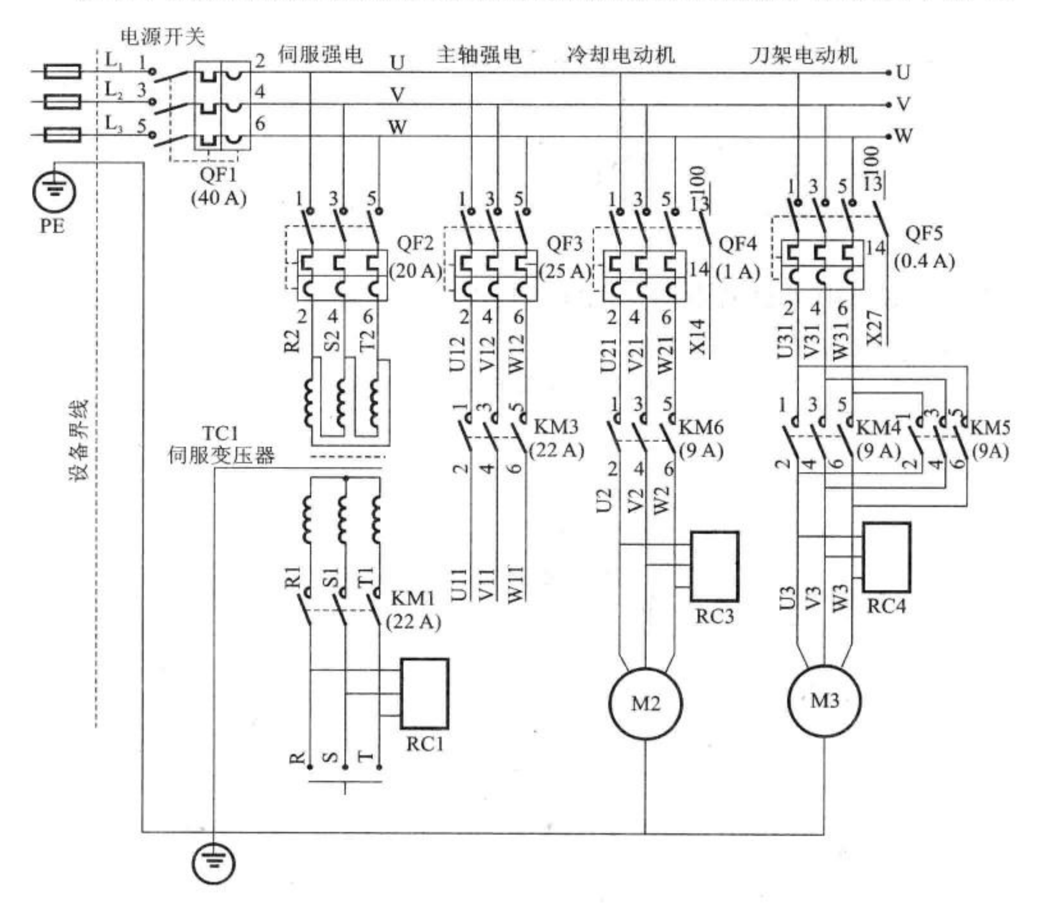


图 5-14　TK1640 型数控车床主电路

QF5 带辅助触头，该触点输入到 PLC 作为 QF4、QF5 的状态信号，并且这两个空气开关的过载保护电流是可调的，可根据电动机的额定电流来调节该设定值。KM3、KM1、KM6 分别为主轴电动机、伺服电动机、冷却电动机的交流接触器，由它们的主触点控制相应电动机；KM4、KM5 为刀架电动机的交流接触器，用于刀架的正反转控制。TC1 为三相伺服变压器，将交流 380 V 变为交流 200 V，以作伺服电源模块。RC1、RC3、RC4 为阻容吸收器，当相应的电路断开后，吸收伺服电源模块、冷却电动机、刀架电动机中的能量，避免产生过电压而损坏器件。

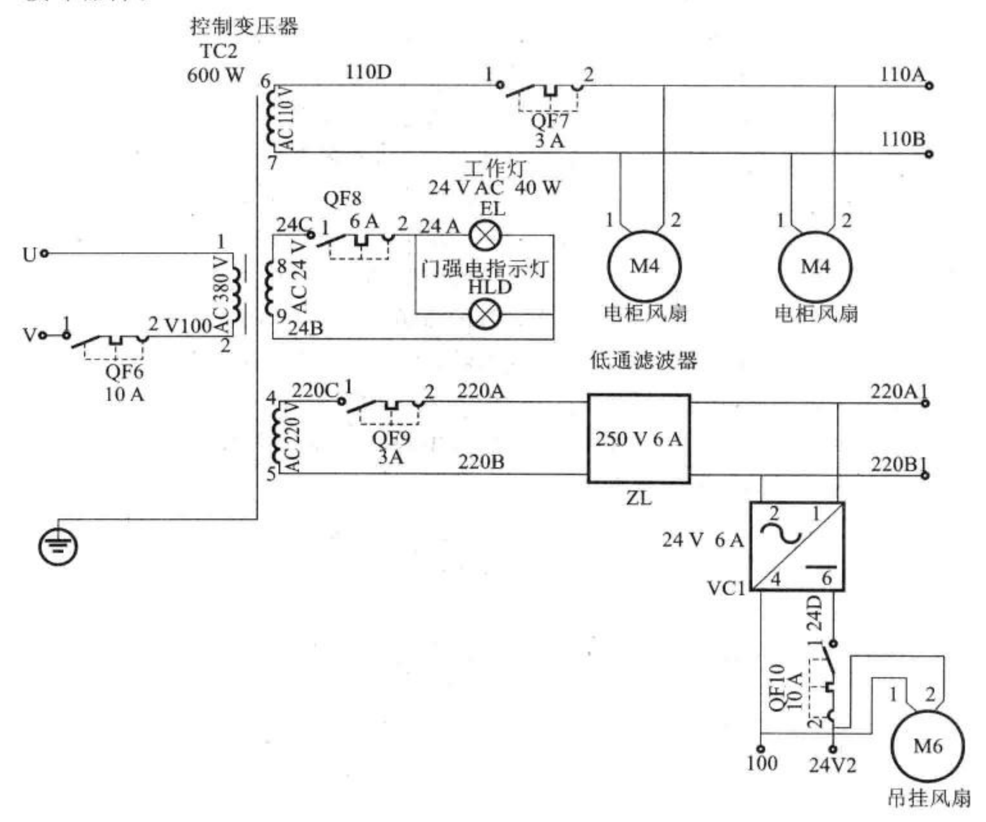


图 5-15　TK1640 型卧式数控车床主电路

3. 电源电路分析

TK1640 型数控车床电源电路如图 5-15 所示。图中 TC2 为控制变压器，初级为 AC 380 V，次级为 AC 110 V、AC 220 V、AC 24 V，其中 AC 110 V 为交流接触器线圈和电柜风扇提供电源；AC 24 V 给电柜门上的指示灯、工作灯提供



电源；AC 220 V 经过低通滤波器滤波后为伺服模块、DC 24 V 电源模块提供电源；VC1 为 DC 24 V 电源模块，为数控系统、PLC 输入/输出、24 V 继电器、吊挂风扇提供电源；QF6、QF7、QF8、QF9、QF10 是空气开关，为电路提供短路和过载等保护。

4. 控制电路分析

1）主轴电动机的控制

图 5-16(a)、(b)分别给出了交流控制回路图和直流控制回路图。

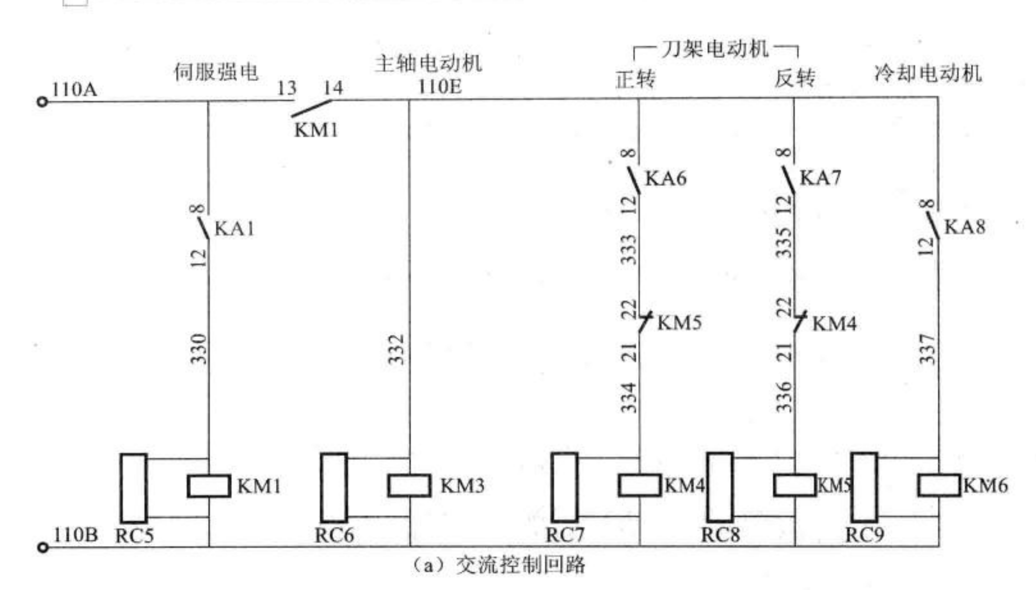
先将 QF2、QF3（如图 5-14）空气开关合上，当机床限位、伺服报警、急停等元件未压下、主轴未报警时（如图 5-16），KA2、KA3 继电器线圈通电，它们的常开触点吸合，并且 PLC 输出点 Y00 发出伺服允许信号，则 KA1 继电器线圈通电，其常开触点闭合；KM1 交流接触器线圈通电，KM1 常开触点闭合；主轴交流接触器 KM3 的线圈通电，KM3 主触点闭合，主轴变频器接通 AC 380 V 电压。若有主轴正转、反转或主轴调速指令时（手动或自动），PLC 输出主轴正转 Y10 或反转 Y11 的控制信号有效（闭合），KA4 或 KA5 的线圈得电，其常开触点闭合，该开关信号直接送入驱动主轴电动机的变频器，以控制主轴正转或反转；主轴转速指令输出对应于主轴转速设定值的直流电压（0～10 V）至主轴变频器上，则主轴按指令值的转速进行正转或反转；当主轴速度到达指令值时，主轴变频器输出主轴速度到达信号给 PLC，此时主轴转动指令完成。

主轴的起动时间、制动时间均由用户对主轴变频器内部的相应参数进行设定。主轴电动机的控制流程如下。

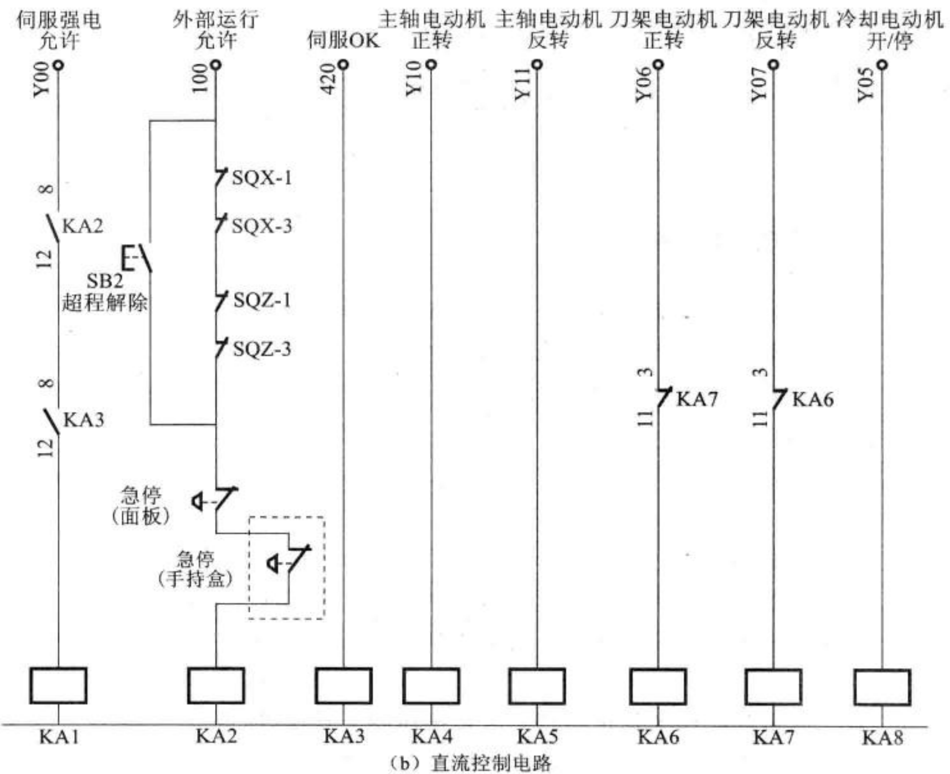


2）刀架电动机的控制

当有手动换刀或自动换刀指令时，数控系统输出刀位信号，这时在图 5-16 中，PLC 的输出 Y06 有效，KA6 继电器线圈通电，其常开触点闭合，KM4 交流接触器线圈通电，KM4 主触点闭合，刀架电动机正转；当 PLC 输入点检测到换刀指令所对应的刀位信号时，PLC 的输出 Y06 变为无效（断开），KA6 线圈断电导致 KM4 线圈断电，致使刀架电动机正转停止；接着 PLC 的输出 Y07 有效，KA7 继电器线圈通电，其常开触点闭合，KM5 交流接触器线圈通电，KM5 主触



(a) 交流控制回路



(b) 直流控制电路

图 5-16 TK1640 型数控车床交直流控制电路

点闭合，刀架电动机反转，延时一定时间后(该时间由 PLC 的参数设定，可根据现场情况作调整)，PLC 的输出 Y07 变为无效(断开)，KA7 线圈断电导致 KM5 线圈断电，从而使 KM5 的主触点断开，刀架电动机反转停止，换刀过程完成。为了防止电源短路，KA6 与 KA7 的线圈、KM4 与 KM5 的线圈进行了互锁。刀架电动机的控制流程如下。

发出手动换刀或自动换刀指令 → PLC输出端Y06有效 → KA6线圈通电，常开触点闭合 → KM4线圈通电，主触点闭合 → 刀架电动机正转

PLC输入点检测到刀位信号时 → PLC输出端Y06无效 → KA6线圈断电，常开触点断开 → KM4线圈断电，主触点断开 → 刀架电动机正转停止

PLC输出端Y07有效 → KA7线圈通电，常开触点闭合 → KM5线圈通电，主触点闭合 → 刀架电动机反转

└→ 延时时间到，PLC输出端Y07无效 → KA7线圈断电，常开触点断开 → KM5线圈断电，主触点断开 → 刀架电动机反转停止

3）冷却电动机控制

当有手动起动或自动冷却指令时，冷却电动机的控制过程如下。

发出手动起动或自动冷却指令 → PLC输出端Y05有效 → KA8线圈通电，常开触点闭合 → KM6交流接触器线圈通电，主触点闭合 → 冷却泵起动工作

思考与练习

1. 试述车床主轴正反转控制与铣床主轴正反转控制有何不同。

2. 试述本章卧式车床主电动机的制动过程。

3. 在本章卧式车床电气控制线路中，可以用 KM3 的辅助触点替代 KA 的触点吗？为什么？

4. 卧式铣床电气控制线路中，设置主轴及进给瞬时点动控制环节的作用是什么？请简述主轴变速时瞬时点动控制的工作原理。

5. 卧式万能铣床是如何实现水平工作台各方向进给互锁控制的？

6. 简述万能铣床控制电路中圆形工作台的工作过程及互锁保护原理。

7. 组合机床常用在什么场合？通常由哪些部件组成？其控制线路有什么特点？

8. 试述双面钻孔组合机床单机半自动循环的工作过程。

9. 简述复杂电气控制原理图的分析方法和一般步骤。

10. 请叙述 TK1640 型卧式数控车床的主要结构和工作原理。

11. 请叙述 TK1640 型卧式数控车床的 X 方向进给与 Z 方向进给的结构原理。

12. 试分析当 TK1640 型卧式数控车床的 PLC 输出端 Y00 有效后主轴电动机的控制过程。

13. 试分析当 TK1640 型卧式数控车床的 PLC 输出端 Y06 有效后刀架电动机的控制过程。

14. 试分析当 TK1640 型卧式数控车床的 PLC 输出端 Y05 有效后冷却电动机的控制过程。

第6章 设备电气控制系统设计

机械设备的设计包括机械设计和电气控制系统设计两个主要部分，两者需同时进行并密切配合，以制订出最佳的电气控制方案。电气控制系统的设计包括电气控制原理设计和电气工艺设计。电气控制系统在满足机械设备加工过程中控制要求的同时，还需考虑设备的自动化程度、控制技术的先进性以及设备的性价比。电气工艺设计的目的是满足电气控制系统的安装简便、布局美观、操作及维修方便的需求。

6.1 电气控制系统设计的基本内容

要使电气控制系统满足设备的工作要求，并能正常可靠地运行，在设计过程中，必须综合考虑各种因素的影响，遵循一些基本的设计原则和设计方法。

6.1.1 电气控制系统设计的基本原则

（1）满足设备的控制要求。在设计前，要熟悉设备的工作过程、结构特点和技术要求，力求所设计的电气控制系统能够最大限度地满足设备对电气控制系统的要求。

（2）力求性价比最佳的设计方案。在满足控制要求和可靠运行的前提下，电气控制系统的设计应力求元器件较少、操作简单、经济实用以及维修方便，选择性价比最佳的传动方案和控制方案。不宜盲目追求高性能和高指标，否则控制系统愈复杂，元器件就愈多，控制系统出故障的概率就愈大，从而降低了控制系统的可靠性。

（3）妥善处理机械与电气的关系。设备中的机械与电气是相互关联和相互

依赖的，要合理处理两者的组合方式。例如，对于设备的制动，可由机械制动实现，也可由电动机的电气制动实现；对于实现位置检测的传感器，在机械设计时，要考虑合理的安装位置，以保证安装、行程调试、更换及维修方便。

(4) 正确合理地选用电气元件。正确合理地选用电气元件，可以降低设备成本；尽量减少元器件的种类和规格，可以为元器件采购、库存管理、易损件的备件及设备维修带来方便。

(5) 操作和维护要方便，外形要协调、美观。

(6) 贯彻最新国家标准。针对电气系统设计及制造，我国颁布了一系列相关标准。标准涉及电气原理图的绘制、元器件参数系列、电气设备的安全等级及设计、安全和警告标志等方面的要求。

6.1.2 电气控制系统设计的内容和步骤

电气控制系统设计包括电气原理图设计和电气工艺设计，它们的设计内容及步骤如下。

1. 电气原理图设计内容及步骤

(1) 拟定电气控制系统设计任务书

拟定电气控制系统设计任务书时，应聚集机械结构、机械工艺及电气控制三方面的设计人员，共同商讨。在电气任务书中，应说明所设计设备的型号、用途、工艺过程、技术性能、传动要求、工作条件以及使用环境等。除此以外，还应说明以下技术指标或要求。

① 控制精度和生产效率指标。

② 电动机拖动方面的要求。如电动机的数量、用途、负载特性、工艺过程、动作要求、控制方式、调速要求、起动、制动及正反转等方面的要求。

③ 电气控制方面的要求。如电气保护、自动化程序、稳定性及抗干扰要求等。

④ 设备电源种类、电压等级、频率及容量要求。

⑤ 电气设备的布局和安装、照明及信号指示、显示和报警方式等方面的要求。

⑥ 目标成本、经费限额、验收标准及验收方式等。

(2) 选择拖动方案和控制方式

机械设备的拖动方式主要有电动机拖动、液压传动和气动等。

电动机拖动方案是指根据生产工艺要求、设备的机械结构、运动要求、负载性质、工艺过程、调速要求及设备成本等条件，确定拖动方式、电动机的类型及



数量等，拟定电动机的起动、运行、调速、转向、制动及联锁等控制要求。

(3) 确定电动机的类型、电压等级、容量、转速及型号。

(4) 设计并绘制电气原理图，对原理图各连接线进行编号。电气原理图包括主电路图、控制电路图以及照明和信号指示电路图。

(5) 选择电气元器件，制订电气元器件明细表。

(6) 编写设计说明书。

2. 电气工艺设计内容及步骤

电气工艺设计主要是提供各种必要的图纸资料，以便于组织电气控制装置的制造、设备的调试、维护及使用。

(1) 设计并绘制电气元器件的布置安装图。

(2) 设计并绘制电气元器件的接线图。

(3) 设计并绘制电气元器件安装板以及非标准元器件的安装图。

(4) 设计并绘制电控箱图，需注意电控箱的安装方式、通风散热方式以及开门方式。

(5) 列出制造电控箱所需的各类元器件及材料清单。

(6) 编写操作说明书、使用说明书以及维护说明书。

6.1.3 电气传动方案的确定

电气传动方案的选择是电气控制系统设计的基础和先决条件，它主要根据设备传动的调速要求确定。设备传动的调速方式可分为机械调速和电气调速。前者是通过电动机驱动变速机构或液压装置等，实现相应运动的调速；后者是采用直流电动机或交流电动机、步进电动机等电动机调速系统，实现设备的电气无级和自动调速。

1. 对于无电气调速要求的设备

在不需要电气调速、起动与制动不频繁的场合，应优先采用笼型感应电动机，因为这种电动机结构简单、运行可靠、价格便宜、维修方便。若配以适当级数的齿轮变速箱或液压调速系统等，就可满足一般设备的调速要求。

只有在负载转矩很大的拖动装置中，才考虑采用绕线转子感应电动机，它的优点是可以通过集电环和电刷，在转子回路中串入外加电阻，以改善起动性能。由于绕线转子感应电动机结构较复杂，它的应用不如笼型感应电动机广泛。

当负载很平稳、容量大、起动和制动次数很少、转速低时，更宜采用同步电动机，因为同步电动机的效率和功率因数高，并且可以通过调节转子直流励磁

电流，使它在超前功率因数下运行，有利于提高电网的功率因数。因此，如大型鼓风机、水泵、球磨机、压缩机、轧钢机等大型设备，常用同步电动机拖动，低速的大型设备采用同步电动机时，这一优点尤为突出。

2. 对于要求电气调速的设备

对于要求电气调速的设备，应根据设备的调速要求（调速范围、调速平滑性、机械特性硬度、转速调节级数等）来选择拖动方案，在满足技术性能的前提下，进行经济性能的比较（设备初期投资、调速效率、功率因数及维修费用等），最后确定最佳拖动方案。

调速范围 $D=2\sim3$，调速级数为 $2\sim4$，一般采用改变极对数的双速或多速笼型感应电动机。

对于调速范围、调速精度以及调速平滑性要求较高的设备，可采用直流调速的直流电动机或交流调速的交流电动机拖动。尽管交流笼型感应电动机的起动及调速性能不如直流电动机，但由于价格便宜及维护工作量少等特点，在满足生产需要的场合，应首先选用交流笼型感应电动机；只有在起动和调速性能等方面不能满足要求时，才考虑选用直流电动机。直流电动机与交流电动机相比，具有体积大、结构复杂及维护困难等缺点。近年来随着电力电子及控制技术的发展，交流调速的性能及成本已能与直流调速装置相媲美，越来越多的直流调速应用领域被交流调速占领，过去由直流电动机拖动的场合现在大部分由交流电动机拖动。

3. 传动方式要与其负载特性相适应

在确定电气传动方案时，必须对电气传动的调速性质和负载特性进行分析，在电动机的整个调速范围内，找出其转矩、功率与转速的关系，即 $M=f(n)$ 和 $P=f(n)$，以确定负载需要恒功率调速还是恒转矩调速。若设备的负载特性与电气传动的调速性质不相适应，可能会引起电气传动的不正常工作，电动机不能得到合理的使用。例如，车床的主轴运动需恒功率传动，进给运动则要求恒转矩传动。对于双速笼型感应电动机，当定子绕组由△接法改为 YY 接法时，转速由低速升为高速，功率变化却不大，适用于恒功率传动；由 Y 接法改为 YY 接法时，电动机输出转矩不变，适用于恒转矩传动。对于直流他励电动机，改变电枢电压调速为恒转矩调速，而改变励磁调速则为恒功率调速。

6.1.4 电气控制方案的选择

随着电子技术、计算机技术、自动控制及精密测量等技术的发展，可供选择的电气控制方案愈来愈多并各有其特色。合理地选择电气控制方案，既能满足



生产技术指标、可靠性及安全性的要求，又能提高经济效益。

(1) 控制方案的选择与传动方案的选择密切相关

在选择传动方案时，要预先考虑到如何实现控制；而选择控制方案一定要在传动方案选定之后。

选择控制方案的着重点应放在减轻劳动强度、保障生产安全、提高产品质量、提高生产效率以及最大限度提高经济效益上，例如，节省投资，减少运行费用，提高电动机的效率和功率因数。

(2)控制方案应与设备的通用化和专用化程度相适应

对于普通机械设备，工作程序固定且较为简单，控制程序中使用的控制元件(如时间继电器和中间继电器)的数量也较少，使用中基本不需要改变原有程序，因此，可采用有触头的继电器控制系统，其控制线路在结构上是呈"固定式"的。

对于控制功能及运算较为复杂的设备，例如，需要进行模拟量处理及数学运算，输入输出信号多，控制程序要求经常变动，或控制系统要求体积小、动作频率高、响应时间快，则可根据情况选用可编程序控制器控制方案、数控或工业计算机控制方案。

6.1.5 电动机的选择

在电动机的选择中，首要选择的是电动机的额定功率，其次应选择电动机的额定转速、结构形式及额定电压等。

1. 电动机额定功率的选择

电动机在负载运行时，其内部总损耗转变为热能使电动机温度升高。而电动机中耐热性最差的是绝缘材料，若损耗太大而使温度超过绝缘材料允许的限度时，绝缘材料的寿命就急剧缩短，严重时会因绝缘遭到破坏，使电动机冒烟而烧毁。这个温度限度称为绝缘材料的允许温度，也就是电动机的允许温度。

电动机的最高允许温升(也称允许温升)就是最高允许温度与标准环境温度40℃的差值，它表示一台电动机能带负载的限度，而电动机的额定功率就代表了这一限度。

选择电动机功率最基本的依据是在规定的负载条件下工作时，电动机的温升不超过允许值。如果功率选得过小，电动机在长期过载下运行，其温升会超过允许值，会加速电动机内绝缘材料的老化，使之寿命降低，甚至可能烧毁电动机；如果功率选得过大，虽能保证设备正常工作，但电动机因长期不能满载而得不到充分利用，使之效率和功率因数降低，从而增加设备投资和运行费用。

根据机械设备的运行特点及负载功率来选择电动机的功率，常用的方法有计算法、统计分析法和类比法。一般情况下，应使所选用的电动机经常运行于额定功率的75%～95%，在充分发挥电动机效用的同时，运行效率也高。

1）计算法

电动机的温升不仅取决于负载功率的大小，还与负载的持续时间（电动机的运行方式）有关。我国将电动机的运行方式按发热情况进行分类，即连续工作制、短时工作制和重复短时（断续）工作制。

（1）连续（长期）工作制电动机功率的计算

① 带恒定负载时电动机功率的计算

这种负载的工作特点是：电动机工作时间长、负载功率 P_L 恒定（如通风机、泵、重型车床、立车、齿轮铣床的主传动等），电动机温升可达到稳定值（即电动机的允许温升）τ_{st}，电动机在连续运行时的负载图及温升曲线如图6-1所示。选择这类工作制的电动机的功率时，只需电动机的额定功率 $P_N \geqslant P_L$ 即可。

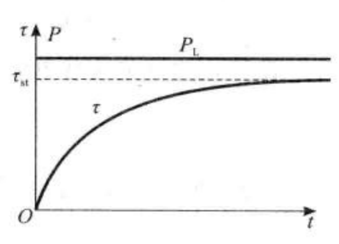


图6-1　恒定负载连续工作负载图及温升曲线

普通电动机的额定功率是按电动机在所允许的温升条件下长期运行时，所能输出的功率规定的，因此，在恒定负载下长期运行时，它的温升将达到稳定值 τ_{st}，这样在电动机的利用上才是最充分的。

这类电动机的起动转矩和最大转矩均大于额定转矩，故一般不必校验起动能力和过载能力，仅在重载起动时，才校验起动能力。

② 带变动负载时电动机功率的计算

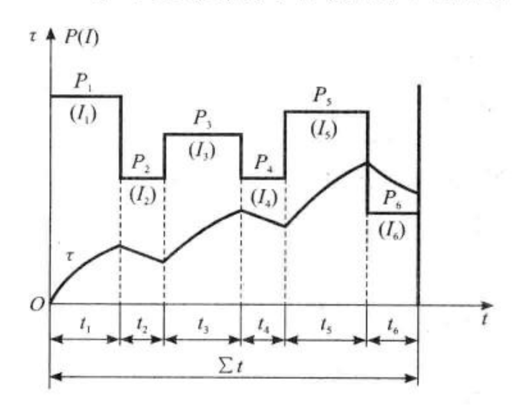


图6-2　变动负载连续工作负载图及温升曲线

这种负载的工作特点是：电动机虽然长期工作，但负载却按一定的循环而周期变化，其负载和温升变化如图6-2所示。大多数生产机械的负载属于这种情况，如车床的主轴电动机、皮带运输机及轧钢机的负载。在这种负载下，其温升也作周期性变动。

对于这种负载下工作的电动机，必须满足以下条件：当负载变到最大时，电动机仍能给出所需的功率，同时电动机的温升应不超过允许值。如果

按最大负载来选择电动机的功率，则电动机得不到充分利用；若按最小负载来选择，则电动机的功率又不够，并且电动机的实际温升会超过允许值。一般采用“等值法”来计算所需的电动机功率，即把实际的变化负载等效成某一恒定负载，两者的温升相同，这样就可根据等效的恒定负载来计算所需的电动机功率。负载可用电流、转矩或功率来表示。

电动机的温升取决于它的发热量，而电动机的发热量又是由损耗产生的。损耗有两部分，一部分是不随负载变化的不变损耗 ΔP（包括铁损和机械损耗），另一部分是与负载电流的平方成正比的可变负载 I^2R（铜损）。对于图 6-2 所示的负载，总损耗为

$$(\Delta P + I_1^2R)t_1 + (\Delta P + I_2^2R)t_2 + \cdots + (\Delta P + I_n^2R)t_n$$

设等效的恒定负载电流为 I_d，在同一工作时间内，电动机的总损耗为

$$(\Delta P + I_d^2R)\sum_{i=1}^{n} t_i$$

根据“等值法”，两者的损耗相同，则其等值电流 I_d 为

$$I_d = \sqrt{\frac{I_1^2t_1 + I_2^2t_2 + \cdots + I_n^2t_n}{\sum_{i=1}^{n} t_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} I_i^2t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i}} \tag{6-1}$$

对于直流电动机（他励或并励），或工作在接近于同步转速的异步电动机，转矩 $T=K_m\Phi I$，由于磁通 Φ 不变，则 $T\propto I$，故式(6-1)可转换为转矩来计算，即等效的恒定转矩为

$$T_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} T_i^2t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i}} \tag{6-2}$$

选择电动机时，使其额定转矩 $T_N \geqslant T_d$ 即可。此方法为“等效转矩法”，由于较易作出生产机械的转矩负载图，故等效转矩法应用较广。

当电动机的机械特性很硬，以至电动机的转速在整个工作过程中可以认为近似不变时，则可近似地认为电动机的功率 $P_d \propto T_d$，此时，式(6-2)可转换为等效功率来计算，即

$$P_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} P_i^2t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i}} \tag{6-3}$$

选择电动机时，使其额定功率 $P_N \geqslant P_d$ 即可。此方法为"等效功率法"，因用功率表示的负载图更易作出，故等效功率法应用更广。

不管采用以上哪一种等效法选择的电动机功率，都只考虑了发热问题，因此，在按"等值法"初选出电动机后，还必须校验其过载能力和起动转矩，如不满足要求，则应适当加大电动机的功率或重选起动转矩较大的电动机。

【例 6-1】 由一台电动机直接拖动某生产机械，其转矩负载图如图 6-3 所示，生产机械要求转速为 1450 r/min 左右，试选择电动机的功率。

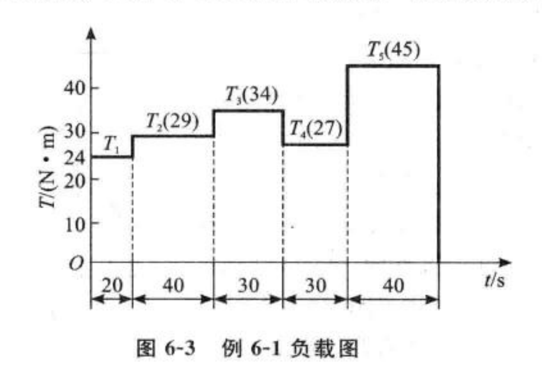


图 6-3 例 6-1 负载图

解 用等效转矩法。由式(6-2)求得等效转矩为

$$T_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} T_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i}}$$

$$= \sqrt{\frac{24^2 \times 20 + 29^2 \times 40 + 34^2 \times 30 + 27^2 \times 30 + 45^2 \times 40}{20 + 40 + 30 + 30 + 40}}\ \text{N} \cdot \text{m}$$

$$= 33.8\ \text{N} \cdot \text{m}$$

其等效功率为

$$P_d = \frac{T_d n}{9550} = \frac{33.8 \times 1450}{9550}\ \text{kW} = 5.13\ \text{kW}$$

可从产品目录中选取 $P_N \geqslant P_d$ 的电动机。

若选择交流笼型感应电动机，可选 Y132-4 型，其额定功率 $P_N = 5.5$ kW，额定转速 $n_N = 1440$ r/min，$T_{st}/T_N = 1.8$，$T_{max}/T_N = 2$（T_{st}——起动转矩，T_{max}——最大转矩，T_N——额定转矩），额定电压为 3 相 380 V、50 Hz，△接法。

下面校验其过载能力。从负载图可知负载的最大转矩 $T_m = 45$ N·m。

所选电动机的额定转矩为

$$T_d = 9550\frac{P_N}{n_N} = 9550\frac{5.5}{1440}\ \mathrm{N\cdot m} = 36.5\ \mathrm{N\cdot m}$$

故电动机的最大转矩为

$$T_{max} = 2T_N = 2\times 36.5\ \mathrm{N\cdot m} = 73\ \mathrm{N\cdot m} > 45\ \mathrm{N\cdot m}$$

由上可知，电动机的最大转矩大于负载最大转矩，因而符合要求，并且起动能力也是满足要求的。

(2) 短时工作制电动机功率的计算

这种工作制的特点是：电动机的工作时间较短，温升达不到稳定值，而且停止时间很长，在停止时间内，电动机的温升能够完全降到零，其负载和温升图如图 6-4 所示。闸门开闭机、升降机、刀架的快移、立车及龙门刨床上的夹紧装置等，都属于短时工作制的机械。由于发热情况与长期工作制的电动机不同，所以，电动机的选择也不一样，既可选择专用短时工作制的电动机，也可选择连续工作制的普通电动机。

图 6-4 短时工作制下电动机负载图与温升曲线

① 选用短时工作制的电动机

我国生产的专供短时工作制的电动机，规定的标准短时运行时间有10 min、30 min、60 min及 90 min 四种。这类电动机铭牌上所标示的额定功率 P_N 是与一定的标准持续时间 t_s 相对应的。为了使电动机不超过允许的温升，要按实际时间选择与上述标准运行时间相接近的电动机。若实际工作时间 t_p 与标准持续时间 t_s 相差太多，就应先将 t_p 下的功率 P_p（生产机械短时工作的实际功率）换算成 t_s 下的功率 P_s，换算公式如下：

$$P_s^2 t_s = P_p^2 t_p$$

$$P_s = P_p\sqrt{t_p/t_s} \tag{6-4}$$

选择短时工作制的电动机时，使其额定功率 $P_N \geqslant P_s$，然后再进行过载能力和起动能力的校验。

② 选用连续工作制的普通电动机

如果按实际功率 P_p 选择连续工作制电动机的额定功率，则电动机因运行时达不到允许温升。为了充分利用在发热条件上的潜在能力，在短时工作状态下，可以使它过载运行，而其过载倍数 $K = P_p/P_N$ 与 t_p/T_h 有关（如图 6-5），故可

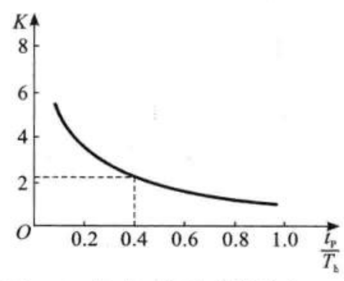


图 6-5 短时工作过载倍数与工作时间关系

按下式选择连续工作制电动机的额定功率：

$$P_N \geqslant P_p/K \tag{6-5}$$

式中：P_p——短时实际负载功率；

P_N——连续工作制电动机的额定功率。

在短时运行时，如果负载是变动的，则可用前面已介绍过的"等值法"先算出其等效功率（转矩或电流），再按上述两种方法选择电动机。

（3）重复短时工作制电动机功率的计算

这种工作制的特点是：电动机工作一段时间后即停歇一段时间，工作与停歇交替进行，且时间都比较短。在工作时间内，电动机的温升不可能达到稳定温升；在停止时间内，温升也不会下降到零。桥式起重机、电梯、组合机床与自动生产线中的主传动电动机等就属于这类工作制。其典型负载图与温升曲线如图 6-6 所示。

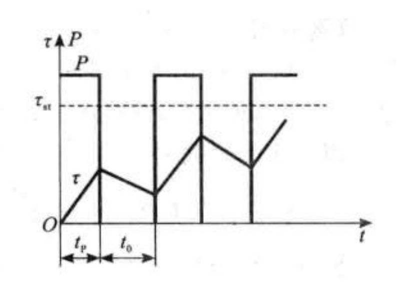


图 6-6 重复短时工作制下电动机典型负载图与温升曲线

通常用暂载率（或持续率）ε 来表征重复短时工作制的工作情况，即

$$\varepsilon = \frac{\text{工作时间}}{\text{工作时间} + \text{停止时间}} = \frac{t_p}{t_p + t_0} \times 100\% \tag{6-6}$$

重复短时工作制下电动机的选择也有以下两种方法。

① 选用重复短时工作制的电动机

我国生产的重复短时工作制的电动机，规定的标准暂载率 ε_s 为 15%、25%、40%和 60%四种。并以 25%为额定负载暂载率 ε_{sN}，同时规定一个周期的总时间 $t_p + t_0$ 不超过 10 min。常用的型号有：YZ(JZ)系列笼型感应电动机、YZR(JZR)系列绕线型感应电动机以及 ZZ 系列和 ZZJ 系列直流电动机。每一台电动机在不同的 ε_s 下，都有不同的额定功率 P_{sN}，以 JZR-11-6 型为例，其额定功率如表 6-1 所示。

表 6-1 不同 ε_s 值下对应的 P_{sN} 值

ε_s(%)	15	25	40	60
P_{sN}(kW)	2.7	2.2	1.8	1.5

由表 6-1 可知，电动机一周期内的工作时间越长，即 ε_s 越大，电动机所允许输出的额定功率便越小。

重复短时工作制电动机功率选择的步骤是：首先根据生产机械的负载图算



出电动机的实际暂载率 ε，如果算出的 ε 值与电动机的额定负载暂载率 ε_{sN}（25%）相等，即可从产品目录中查得额定功率 P_{sN}，所选电动机的 P_{sN} 应等于或略大于生产机械所需功率 P。如果算出的 ε 值不等于 ε_{sN}，则可按下式进行换算：

$$P_s = P\sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sN}}} = P\sqrt{\frac{\varepsilon}{0.25}} \tag{6-7}$$

按式(6-7)换算完后，再从产品目录中选取 P_{sN} 等于或略大于 P_s 的电动机即可。

【例 6-2】 有一起重机，其工作负载图如图 6-6 所示，其中 $P=10$ kW，工作时间 $t_p=0.91$ min，空车时间 $t_0=2.34$ min，要求采用绕线型感应电动机，转速为 1000 r/min 左右，试选用一台合适的电动机。

解 实际暂载率为

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p+t_0}\times 100\% = \frac{0.91}{0.91+2.34}\times 100\% = 28\%$$

换算到相近的额定负载暂载率 $\varepsilon_{sN}=25\%$ 时，其所需相对应的等效负载为

$$P_s = P\sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sN}}} = 10\times\sqrt{\frac{28\%}{25\%}}\ \text{kW} = 10.58\ \text{kW}$$

查产品目录，可选取 YZR31-6 型绕线型感应电动机，其额定功率为 $P_{sN}=11$ kW（$\varepsilon_{sN}=25\%$ 时），额定转速 $n_N=953$ r/min。

② 选用连续工作制的普通电动机

如果没有现成的重复短时工作制电动机可供选用，则也可选用连续工作制的电动机，此时可看成 ε_s 为 100%，然后按上述方法选择电动机。如上例所示数据，此时对应的等效负载功率为

$$P_s = P\sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sN}}} = 10\times\sqrt{\frac{28\%}{100\%}}\ \text{kW} = 5.3\ \text{kW}$$

查产品目录，可选用型号为 YR61-6 的连续工作制绕线型感应电动机，其额定功率为 $P_N=7$ kW，额定转速 $n_N=940$ r/min。

在重复短时工作制的情况下，如果负载是变动的，则仍可用“等值法”，先算出其等效功率 P，再按上述方法选取电动机。选好电动机的功率后，也要进行过载能力的校验。

负载暂载率 $\varepsilon<10\%$ 时，可按短时工作制选择电动机；当 $\varepsilon>70\%$ 时，则可按连续工作制选择电动机。

重复周期很短（$t_p+t_0<2$ min），起、制动或正、反转十分频繁的情况下，必须考虑起、制动电流的影响，因而，在选择电动机的功率时，要适当选大些。

电动机铭牌上的额定功率是在一定条件下，电动机允许的最大输出功率，

如果工况发生了变化，则需作适当调整。如常年环境温度 θ_0 偏离标准环境温度 +40℃较多时，电动机的功率可作适当修正，一般 θ_0 变化±10℃时，所选电动机的 P_N 可修正±10%左右；风扇冷却式电动机长期处于低速下运行时，散热条件恶化，电动机的额定功率必须降低使用；海拔高于 1000 m 的高原地区，空气稀薄，散热条件差，电动机的额定功率也应降低使用。

2）统计分析法

所谓统计分析法，就是将各国同类型先进的机床电动机功率进行统计和分析，从中找出电动机功率与机床主要参数之间的关系，再将这个关系用公式表达，作为设计制造机床时选择电动机功率的主要依据，这种方法简单且实用。下面列出几种典型机床主传动电动机功率 P 的统计分析法公式。

（1）卧式车床

$$P = 36.5D^{1.54} \tag{6-8}$$

式中：D——工件最大直径（m）。

（2）立式车床

$$P = 20D^{0.88} \tag{6-9}$$

式中：D——工件最大直径（m）。

（3）摇臂钻床

$$P = 0.0646D^{1.19} \tag{6-10}$$

式中：D——最大钻孔直径（mm）。

（4）卧式镗床

$$P = 0.004D^{1.7} \tag{6-11}$$

式中：D——镗杆直径（mm）。

（5）外圆磨床

$$P = 0.1KB \tag{6-12}$$

式中：B——砂轮宽度（mm）；

K——考虑砂轮主轴采用不同轴承时的系数。当采用滚动轴承时，$K=0.8\sim1.1$；当采用滑动轴承时，$K=1.0\sim1.3$。

（6）龙门铣床

$$P = B^{1.16}/166 \tag{6-13}$$

式中：B——工作台宽度（mm）。

【例 6-3】 国产 C660 型车床，其加工件最大直径为 1250 mm。试按统计分析法，计算主传动电动机所需的功率。

解 $P = 36.5D^{1.54} = 36.5 \times (1.25)^{1.54}\ \text{kW} = 51.4\ \text{kW}$

该型号车床实际选用 60 kW 电动机，计算值与实际值相近。

3）类比法

所谓类比法，就是调查经过长期考验的同类生产机械，看它采用多大容量的电动机，然后通过主要参数（负载性质、工作特性及静负载功率）和工作条件类比的方法，来确定新生产机械的电动机功率。

2. 电动机额定电压的选择

交流电动机额定电压应与供电电网电压一致，一般车间低压电网电压为380 V。因此，中小型感应电动机额定电压为220/380 V（△/Y 连接）及380/600 V（△/Y 连接）两种，后者可用于Y/△起动。

直流电动机的额定电压也要与电源电压相一致。当直流电动机由单独的直流发电机供电时，额定电压常用220 V或110 V；大功率电动机可提高到600～800 V，甚至为1000 V。

当直流电动机由晶闸管整流装置供电时，为配合不同的整流电路形式，新改进的Z3型电动机除了原有的电压等级外，还增设了160 V（配合单相整流）及440 V（配合三相桥式整流）两种电压等级；Z2型电动机也增加了180 V、340 V及440 V三种电压等级。

3. 电动机额定转速的选择

对于额定功率相同的电动机，额定转速愈高，电动机尺寸、自重和成本愈小，因此选用高速电动机较为经济。但由于生产机械所需转速一定，电动机转速愈高，传动机构转速比愈大，则传动机构愈复杂。因此，应综合考虑电动机与机械两方面的多种因素来确定电动机的额定转速。

（1）电动机连续工作时，若不经常起、制动，则可从设备初始投资、占地面积及维护费用等方面，以几个不同的额定转速进行全面比较，最后确定转速比和电动机的额定转速。

（2）电动机经常起、制动及反转，但过渡过程持续时间对生产率影响不大时，除考虑初始投资外，主要以过渡过程能量损耗最小为条件来选择转速比及电动机的额定转速。

（3）电动机经常起、制动及反转，过渡过程持续时间对生产率影响较大时，主要以过渡过程时间最短为条件来选择电动机的额定转速。

4. 电动机结构形式的选择

（1）按安装方式的不同，电动机的结构形式可分为卧式（轴是水平的）与立式（轴是立式的）两种，应根据电动机与工作机构的连接方便及紧凑为原则来选择。如立铣、龙门铣及立式钻床等机床的主轴均垂直于工作台，应选用立式电动机，它比选用卧式电动机要减少一对变换方向的伞齿轮。

（2）按不同工作环境，选择电动机的防护形式，以保护电动机长期工作而不被损坏。电动机的结构形式有开启式、防护式、封闭式和防爆式四种。

① 开启式。开启式电动机的价格便宜，散热条件最好，但由于转子和绕组暴露在空气中，容易被水汽、灰尘、铁屑、油污等侵蚀，影响电动机的正常工作及使用寿命。因此，它只能用于干燥、灰尘很少又无腐蚀性和爆炸性气体的环境。

② 防护式。防护式电动机一般可防止水滴、铁屑等外界杂物落入电动机内部，但不能防止潮湿气体及灰尘的侵入。它只适用于较干燥且灰尘不多又无腐蚀性和爆炸性气体的工作环境。这种电动机的通风散热条件也较好。

③ 封闭式。封闭式电动机有自冷式、强迫通风式和密闭式三种。自冷式电动机一般自带风扇，自冷式和强迫通风式电动机能防止任何方向的水滴或杂物侵入电动机，潮湿空气和灰尘也不易侵入，因此适用于潮湿、多尘、易受风雨侵蚀以及有腐蚀性气体等较恶劣的工作环境，应用最普遍。而密闭式电动机，则适用于浸入液体中的生产机械，如潜水泵等。

④ 防爆式。防爆式电动机是在密封结构的基础上制成隔爆型、增安型和正压型等，适用于有爆炸危险的工作环境，如矿井、油库及煤气站等场所。

此外，对于湿热地带、高海拔地带及船舶等应用，还应选用具有特殊防护要求的电动机。

6.2 常用电气元器件选择

正确、合理地选用各种电气元器件是控制线路安全、可靠工作的保证，也是使电气控制设备具有一定的先进性和良好经济性的重要环节。

6.2.1 电气元器件选择的基本原则

（1）根据对控制元器件的功能要求，确定电气元器件的类型。例如，当元器件用于通、断功率较大的主电路时，应选接触器；若元器件用于切换功率较小的电路（如控制电路及信号指示与照明电路）时，则应选用中间继电器；若有延时要求，则应选择时间继电器。

（2）确定元器件承载能力的临界值及使用寿命。主要是根据电气控制的电压、电流及功率大小来确定元器件的规格。

(3) 确定元器件预期的工作环境及供应情况。如防油、防尘和火源等。

(4) 确定元器件在应用时所需的可靠性等。确定用以改善元器件效用的老化试验或其他筛选试验,采用与可靠性设计相适应的降额系数等,进行一些必要的计算和校核。

6.2.2 电气元器件的选择

1. 各种按钮和开关的选择

1) 按钮

按钮通常用来短时接通或断开小电流控制电路。其选用主要是根据需要的触点对数、动作要求、结构形式、颜色以及是否需要带指示灯等要求。如起动按钮选绿色,停止按钮选红色,紧急停止按钮选蘑菇式。目前,按钮产品有多种结构形式、多种触点组合以及多种颜色,供不同使用条件选用。

按钮额定电压有交流 500 V 及直流 440 V,额定电流通常为 5 A。常选用的按钮有 LA2、LA10、LA19 及 LA20 等系列。符合 IEC 国际标准和 GB 1497—85 及 GB 5226—85 国家标准的产品有 LAY3 系列,额定工作电流为 1.5～8 A。

2) 万能转换开关

万能转换开关主要作为控制电路的转换及配电设备的远距离控制,也可作为小容量电动机的起动、制动及换向控制。常用的有 LW5 和 LW6 系列。主要根据工作电压和工作电流来选用合适的系列,按控制要求选触头数量、手柄形式及定位特征。

3) 刀开关

刀开关又称闸刀,主要用于接通和断开长期工作设备的电源以及不经常起动和制动的容量小于 7.5 kW 的异步电动机。刀开关主要根据电源的种类、电压等级、用电设备容量、所需极数来选用。当用刀开关来控制电动机时,其额定电流要大于电动机额定电流的 3 倍。

4) 组合开关

组合开关主要用于电源的引入与隔离,也叫电源隔离开关。它也可以起/停 5 kW 以下的异步电动机,但每小时的接通次数不宜超过 10～20 次。

组合开关主要根据电源种类、电压等级、所需触头数量以及被控电气设备的额定容量进行选取。额定电压 500 V 的组合开关适用于交流 380 V 的控制,额定电压 250 V 的组合开关适用于交流 220 V 的控制。当用于照明或电热电路时,组合开关的额定电流应大于或等于被控电路中各种负载电流的总和;当用于控制电动机时,由于电动机有较大的起动电流,组合开关的额定电流一般

取电动机额定电流的 1.5～2.5 倍。

常用的组合开关为 HZ 系列：HZ1、HZ2…HZ10 等，其额定电流有 10 A、25 A、60 A、100 A 四种，适用于交流 380 V 以下或直流 220 V 以下的电气设备。

5）行程开关

行程开关主要用于控制运动机构的行程、位置、限位或联锁等。根据控制功能、安装位置、电压电流等级、触头种类和数量来选择结构和型号。常用的有 LX2、LX19、JLXK1 和 LXK3 型行程开关以及 LXW-11、JLXW-11 和 LXW5 型等微动开关。对于要求动作快及灵敏度高的行程控制，可采用无触点接近开关（电感式、电容式、光电式或霍尔接近开关等）。

6）自动开关

自动开关简称空气开关或空开，又称断路器，由于具有过载、短路和欠压保护作用，它常作为设备的电源引入开关。它有框架式、塑料外壳式、限流式、手动操作式和电动操作式等类型。选用时除考虑额定电流和额定电压外，还应考虑用于短路保护的电磁瞬时脱扣器的电流整定值应略大于电路最大短路电流。常用的断路器有 DZ10 系列（额定电流分 10 A、100 A、200 A 及 600 A 四个等级），符合 IEC 标准的有 3VE 系列（额定电流 0.16～3 A）。

2. 接触器的选择

接触器的产品系列是按使用类别设计的。在选用接触器时，首先根据接触器所控制的负载类型，选择相应使用类别的接触器；然后主要考虑主触头的额定电压、额定电流以及控制线圈的额定电压；其次考虑触头的数量（主触头和辅助触头）和种类（常开或常闭）、操作频率等。根据主触头通断电流的种类，接触器分为交流接触器和直流接触器。

1）接触器的使用类别及常用型号

接触器用于不同负载时，对主触头接通与分断能力的要求也不同，要按不同的使用条件来选用相应使用类别的接触器，用于电气拖动控制系统中的接触器常见使用类别及典型用途如表 6-2 所示。

表 6-2 接触器使用类别及典型用途

电流种类	使用类别	典型用途
AC（交流）	AC1	无感或微感负载、电阻炉
	AC2	绕线式感应电动机的起动、分断
	AC3	笼型感应电动机的起动、运转中断开
	AC4	笼型感应电动机的起动、反接制动或反向运转、点动

续表

电流种类	使用类别	典型用途
DC(直流)	DC1	无感或微感负载、电阻炉
	DC3	并励电动机的起动、反接制动、反向和点动
	DC5	串励电动机的起动、反接制动、反向和点动

接触器的使用类别代号通常标注在产品的名牌或手册中。表 6-2 中要求接触器主触点达到的接通和分断能力如下。

① AC1 和 DC1 类允许接通和分断额定电流；

② AC2、DC3 和 DC5 类允许接通和分断 4 倍额定电流；

③ AC3 类允许接通 6 倍额定电流和分断额定电流；

④ AC4 类允许接通和分断 6 倍额定电流。

交流接触器主要有 CJ10 及 CJ20 等系列，直流接触器多用 CZ0 系列。

2）接触器主触头的额定电压和额定电流

常用接触器主触头的额定电压和额定电流值如表 6-3 所示。

表 6-3　接触器主触头额定电压和额定电流等级

	交流接触器	直流接触器
额定电压(V)	127、220、380、500、660	110、220、440、660
额定电流(A)	5、10、20、40、60、100、150、250、400、600	5、10、20、40、60、100、150、250、400、600

需要根据接触器主触头接通与分断主电路的电压等级决定主触头的额定电压，一般要大于或等于主电路的额定电压。

根据电动机的容量，用以下经验公式，计算主触头的额定电流：

$$I_{ec} \geqslant I_c = \frac{P_N \times 10^3}{KU_N} \tag{6-14}$$

式中：I_{ec}——被选定接触器的主触头额定电流(A)；

I_c——接触器主触头电流(A)；

P_N——被控电动机的额定功率(kW)；

U_N——电动机的额定线电压(V)；

K——经验常数，一般取 1～1.4。

实际选择时，还可参照下述方法，以快速确定主触头的电流等级。

① 对于持续运行的设备，接触器主触头的实际通断电流能力为其额定电流的 67%～75%，即主触头额定电流为 100 A 的交流接触器，只能控制最大额定电流为 67～75 A以下的设备。

② 对于断续运行的设备，接触器主触头的实际通断电流能力为其额定电流的 80%，即主触头额定电流为 100 A 的交流接触器，只能控制最大额定电流为 80 A 以下的设备。

③ 对于反复短时工作的设备，接触器主触头的实际通断电流能力为其额定电流的 116%～120%，即主触头额定电流为 100 A 的交流接触器，只能控制最大额定电流为 116～120 A 以下的设备。

3）接触器线圈的额定电压

对于同一系列和同一容量等级的接触器，其线圈的额定电压有好几种规格，常用的接触器线圈额定电压等级如表 6-4 所示。选用时，一般交流负载用交流线圈的接触器，直流负载用直流线圈的接触器，但交流负载频繁动作时，可采用直流线圈的交流接触器。线圈的额定电压应等于所连接的控制电路电压，为保证接触器可靠工作，线圈的实际电压应为其额定电压的 85%～105%。

表 6-4　接触器线圈额定电压等级

	交流线圈	直流线圈
线圈电压（V）	36、110、127、220、380	24、48、100、220、440

4）其他参数

三相交流电路中一般选用三极接触器（三对主触头），当需要控制零线时，则选用四极交流接触器；单相交流和直流电路中，一般选用两极或三极并联。一般场合选用电磁式接触器，易燃易爆场合应选用防爆型及真空接触器。接触器一般各有一对或两对常开和常闭辅助触头，当根据控制要求，所需辅助触头的数量不够时，可在接触器上安装辅助触头模块。

接触器额定操作频率是指每小时的操作次数。交流接触器一般不超过 600 次/h，直流接触器一般不超过 1200 次/h。操作频率直接影响接触器的寿命和灭弧罩的工作条件，对于交流接触器还影响线圈的温升。

3. 继电器的选择

1）中间继电器的选用

中间继电器用于控制电路中传递与转换信号、扩大控制路数以及将小功率控制信号转换为大容量的触头控制，以扩充交流接触器及其他电器的控制作用。主要根据触头的数量及种类来确定其型号，同时注意吸引线圈的额定电压应等于控制电路的电压。常用的中间继电器有 JZ7 等系列，新产品有 JDZ1 系列。

2）电流及电压继电器的选用

电流及电压继电器的选用主要依据被控制或被保护对象的特性、触头的种类和数量、控制电路的电压和电流以及负载的性质等因素，同时线圈的电压和



电流应满足控制电路的要求。

如果控制电流超过继电器触头的额定电流,可将触头并联使用,也可以采用触头串联使用的方法来提高触头的分断能力。

3)时间继电器的选用

选用时应考虑延时方式(通电延时或断电延时)、延时范围、延时精度要求、外形尺寸、安装方式及价格等因素。

常用的时间继电器有空气式、电磁式、电动式、晶体管式以及数字式时间继电器等,在延时精度要求不高且电源电压波动的场合,宜选用价格低廉的电磁式或空气阻尼式时间继电器;当延时范围大,延时精度要求较高时,可选用电动式或晶体管式时间继电器;延时精度要求更高时,可选用数字式时间继电器。选用时需要注意线圈电压等级能否满足控制电路的要求。

4)热继电器的选用

对工作时间较短而停歇时间长的电动机(如机床的刀架或工作台)或虽长期工作但过载可能性很小的电动机(如电风扇),可以不设热继电器(不需过载保护),除此以外,一般电动机都应考虑过载保护。

热继电器的结构形式主要有两相式、三相式、三相带断相保护式等。对于星形连接的电动机或电源对称性较好的情况,可采用两相或三相结构的通用热继电器;对于三角形连接的电动机或电源对称性不够好的情况,应选用带断相保护的三相结构热继电器;在重要场合或容量较大的电动机,可选用电子式热继电器(电子保护器)。

在选好热继电器的结构形式后,需要根据电动机的额定电流来确定热继电器的额定电流和发热元件的电流等级。热元件的额定整定电流值,一般按电动机额定电流的 0.95~1.05 倍选用,热继电器的额定电流应大于或等于发热元件的额定整定电流值。一般过载电流是整定电流的 1.2 倍时,热继电器动作时间小于 20 min;过载电流是整定电流的 1.5 倍时,动作时间小于 2 min;而过载电流是整定电流的 6 倍时,动作时间小于 5 s。常用的产品有 JRS1 等系列。

如遇到下列情况,热元件的额定整定电流值要比电动机的额定电流值高一些,否则,会因电动机电流过大,热继电器动作,致使电动机断电。

① 电动机负载惯性转矩非常大,以至起动时间长。

② 电动机所带的设备不允许任意停电。

③ 电动机拖动的设备负载为冲击负载,如冲床及剪床等设备。

4. 熔断器的选择

熔断器的选择包括熔断器的类型、额定电压、额定电流及熔体额定电流。

1）熔断器类型的选择

主要根据负载的保护特性和短路电流的大小来选择熔断器的类型。其主要类型有插入式、螺旋式、无填料封闭管式和填料封闭管式。用于照明电路和电动机保护时，一般应考虑过载保护，此时希望熔断器的熔断系数适当小些，所以容量较小的照明线路和电动机宜采用熔体为铅锌合金的 RC1A 系列瓷插入式熔断器；而大容量的照明线路和电动机，除过载保护外，还应考虑短路时的分断短路电流能力，若短路电流较小时，可采用熔体为锡质的 RC1A 系列或熔体为锌质的 RM10 系列无填料密闭管式熔断器；用于车间低压供电线路的保护时，一般应考虑短路时的分断能力，当短路电流较大时，宜采用具有较高分断能力的 RL1 系列螺旋式熔断器，当短路电流相当大时，宜采用有限流作用的 RT10 系列填料封闭式或 RT12 系列螺栓连接式熔断器。

2）熔断器额定电压的选择

应使熔断器的额定电压大于或等于所在电路的额定电压。

3）熔体额定电流的选择

对负载电流较平稳的电气设备，如照明及电热设备等，熔体的额定电流应等于或稍大于负载的额定电流。即

$$I_R \geqslant I_N \tag{6-15}$$

对于单台电动机不经常起动时

$$I_R \geqslant (1.5 \sim 2.5) I_N \tag{6-16}$$

轻载起动或起动时间较短时，系数可取 1.5；重载或起动时间较长时，系数可取 2.5；当频繁起动时，上式系数为 3～4。

对于多台电动机共用一组熔断器时

$$I_R \geqslant (1.5 \sim 2.5) I_{N\max} + \sum I_N \tag{6-17}$$

式中：I_R——熔体额定电流；

I_N——电动机额定电流；

$I_{N\max}$——容量最大的电动机之额定电流；

$\sum I_N$——除容量最大的电动机之外，其余电动机额定电流之和。

4）注意事项

安装熔断器时，必须在断电情况下操作；熔断器应安装在线路的各相线（火线）上，在三相四线制的中性线上严禁安装熔断器，在单相二线制的中性线上应安装熔断器；螺旋式熔断器在接线时，为了更换熔断管时的安全，下接线端应接电源，而连接螺口的上接线端应接负载；用熔断器进行多级保护时，应注意各级间的协调配合，下一级熔断器熔断电流应比上一级熔断电流小 1～2 个级差，以



免出现越级熔断。

5. 控制变压器的选择

控制变压器用于机械电气设备中，为其控制电路、照明电路及信号指示电路提供电源。简单的控制电路电源可直接使用主电路电源，即直接用交流电压380 V或220 V；当控制电路复杂或控制电路中使用电气元件较多时，一般需采用经变压器降压的控制电源，以提高控制线路的安全和可靠性。根据我国机械行业标准JB/T 5555—2001，控制变压器的规格如表6-5所示。

表6-5 控制变压器规格

额定输出容量(VA)	额定输入电压(V)	额定输出电压(V)
40、(50)、63、100、(150)、160、250、(300)、400、(500)、630、(800)、1000、(1500)、1600、(2000)、2500、3000	380、220	220、(127)、110、(36)、24、12、6

注：优先采用不带括号的。

可根据以下两种情况来确定控制变压器的容量。

(1) 根据控制变压器在最大工作负载时所需的功率进行计算，以保证变压器在长期工作时不致超过允许温升。一般可依下式计算：

$$P_T \geqslant K_T \sum P_{xc} \tag{6-18}$$

式中：P_T——所需变压器容量(VA)；

K_T——变压器容量储备系数，一般取1.1～1.25；

$\sum P_{xc}$——控制电路在最大负载工作时电气元件所需的总功率(VA)。对于交流电气元件(交流接触器、交流中间继电器及交流电磁铁等)，P_{xc}应取该元件的吸持功率值。

(2) 变压器的容量P_T应能保证部分已吸合的电气元件在其他电气元件起动时，仍能可靠地保持吸合，同时应能保证这些将要起动的电气元件也能起动吸合。此时，P_T按以下公式计算：

$$P_T \geqslant 0.6\sum P_{xc} + 0.25\sum P_{jq} + 0.125K_L\sum P_{dq} \tag{6-19}$$

式中：$\sum P_{xc}$——已经吸合的电气元件所需的总功率(VA)；

$\sum P_{jq}$——所有同时起动的交流接触器和交流中间继电器在起动时所需的总功率(VA)；

$\sum P_{dq}$——所有同时起动的电磁铁在起动时所需的总功率(VA)；

K_L——电磁铁的工作行程L_p与额定行程L_N之比的修正系数。当$L_p/L_N=0.5$～0.8时，$K_L=0.7$～0.8；当$L_p/L_N=0.85$～0.9时，$K_L=0.85$～

0.95；当 $L_p/L_N>0.9$ 时，$K_L=1$。

控制变压器所需的容量应由以上两式所计算的最大 P_T 决定。

常用交流电磁电器在起动与吸持时的线圈功率如表6-6所示。

表6-6 常用交流电磁电器起动与吸持功率

电气元件名称	电器型号	起动功率 P_{dq}(VA)	吸持功率 P_{xc}(VA)	P_{dq}/P_{xc}
中间继电器	JZ7	75	12	6.3
交流接触器	CJ20-10	65	8.3	7.8
	CJ20-16	62	8.5	7.3
	CJ20-25	93	14	6.6
	CJ20-40	175	19	9.2
	CJ20-63	480	57	8.4
	CJT1-10	65	11	5.9
	CJT1-20	140	22	6.4
	CJT1-40	230	32	7.2
	CJT1-60	485	95	5.1
交流牵引电磁铁	MQ1-5101	450	50	9.0
	MQ1-5111	1000	80	12.5
	MQ1-5121	1700	95	17.9
	MQ1-5131	2200	130	16.9
	MQ1-5141	10000	470	21.3

6. 主电路中某些电阻的计算

1）笼型感应电动机起动限流电阻的计算

在电动机定子串电阻降压起动方式中，限流电阻阻值由下式近似计算：

$$R_q=\frac{220\sqrt{\frac{K_q}{K_{qr}}-1}}{I_N K_q} \tag{6-20}$$

式中：R_q——每相起动限流电阻的阻值(Ω)；

I_N——电动机的额定电流(A)；

K_q——不加电阻时，电动机的起动电流与额定电流之比(可查手册)；

K_{qr}——加入起动电阻后，电动机的起动电流与额定电流之比。

2）笼型感应电动机反接制动电阻的计算

反接制动电阻阻值按下式计算：

$$R_{zr}=\frac{110\sqrt{4\frac{K_q}{K_{zr}}-3.5}}{K_q} \tag{6-21}$$

式中：R_{zr}——每相反接制动限流电阻的阻值(Ω)；

K_{zr}——接入反接制动电阻后，电动机的反接制动电流与额定电流之比。

6.3 电气控制电路原理图设计

当生产机械的传动方案及控制方案确定后，即可进行电气控制电路原理图的设计。电气控制系统原理图应包括主电路、控制电路以及信号指示与照明电路图。还应制订电气元件明细表。如果机械设备为自动工作循环，还应该有工作循环图和工步状态表。

电气控制原理图的设计顺序为主电路→控制电路→辅助电路(信号指示与照明电路)→互锁与保护→反复修改与完善，最后绘制总原理图。

6.3.1 原理图设计的一般原则

在电气原理图的设计过程中，通常应遵循以下几个原则：

(1) 应最大限度地满足生产机械和工艺的要求；

(2) 在满足生产要求的前提下，力求控制电路简单、经济和实用，尽量选用经过实际考验过的电路；

(3) 确保使用安全、可靠，应有必要的保护和互锁环节，防止误操作时发生重大事故；

(4) 符合人-机关系，便于使用和维护。

6.3.2 控制电路电源选择及主电路设计

1. 控制电路及信号指示与照明电路的电源选择

在选择控制电路及信号指示与照明电路的电源时，应尽量减少控制电路中电压的种类，控制电源的容量及电压等级应符合控制变压器的标准等级。具体的选择方法如表 6-7 所示。

2. 主电路设计

对于三相笼型感应电动机，主电路的设计主要应考虑电动机的起动与制动方式、正反转控制及主电路的保护。

表 6-7 机械设备中控制电路常用电源电压

电路种类		常用的电压值(V)	电源设备
交流	交流电气传动的控制电路比较简单	380、220	直接采用动力电源
	交流电气传动的控制电路比较复杂	220、110	采用控制变压器
	照明及信号指示电路	36、24、12、6	采用控制变压器
直流	直流电气传动的控制电路	220、110	整流器
	直流电磁铁及离合器的控制电路	24	整流器

(1) 确定电动机是全压起动还是降压起动。

根据制造标准,低压笼型感应电动机均允许全压,但由于其全压起动电流是额定电流的 5~7 倍,全压起动必须满足电源变压器容量足够大的条件,否则,过大的起动电流会引起电网电压的显著下降。因此,采用全压起动要满足以下几个条件之一,否则必须采用降压起动。通常只要电动机的额定功率不超过电源变压器额定容量的 30%,即可全压起动。

① 电动机频繁起动情况下,在起动时造成的电网电压降不大于电源额定电压的 10%。

② 电动机不频繁起动情况下,在起动时造成的电网电压降不大于电源额定电压的 15%。

③ 小容量电网、小型电动机或专用变压器供电情况下,电动机全压起动电流满足下式:

$$\frac{I_{st}}{I_N} \leqslant \frac{3}{4} + \frac{P_{TN}}{4P_N} \tag{6-22}$$

式中:I_{st}——电动机全压起动电流(A);

I_N——电动机额定电流(A);

P_{TN}——电源变压器额定容量(kW);

P_N——电动机额定功率(kW)。

(2) 对于正反转控制,应防止误操作而引起的电源相间短路,必须在控制电路中考虑保护措施。

(3) 必须注意主电路中的熔断器保护、过载保护及其他安全保护元件的选择与设置。

(4) 主电路与控制电路应保持严格的对应关系。

6.3.3 电路图设计中的注意事项

(1) 尽量减少电气元件的数量及其电源的种类,选用标准件,并尽可能选用

相同型号的电气元件。

(2) 在满足功能要求的前提下,尽可能简化电路、减少触头数量,以提高经济性和可靠性。电气元件越少以及触头数量越少,设备发生故障的概率就越低。

① 合并同类触头。由图 6-7 可知,在获得同样控制功能的情况下,图 6-7(b)和图6-7(d)比对应的图 6-7(a)和图 6-7(c)少了一对触头。在合并同类触头时,由于流过触头的电流增加,故应注意触头额定电流值的限制。

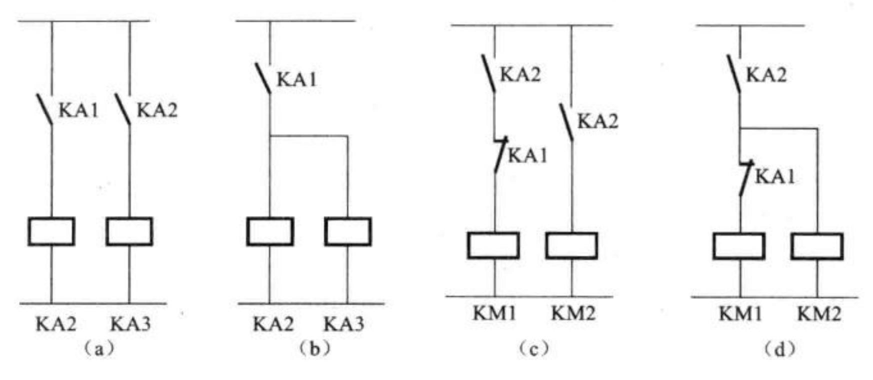


图 6-7 合并同类触头

② 利用转换触头。图 6-8 利用具有转换触头的中间继电器,将两对触头合并为一对转换触头。

③ 直流控制电路中,利用二极管的单向导电性可有效地减少触头数量。图 6-9 所示的两个直流电路是等效的,对于弱电控制电路,这是行之有效的方法,但在使用时要注意电源和二极管的极性。

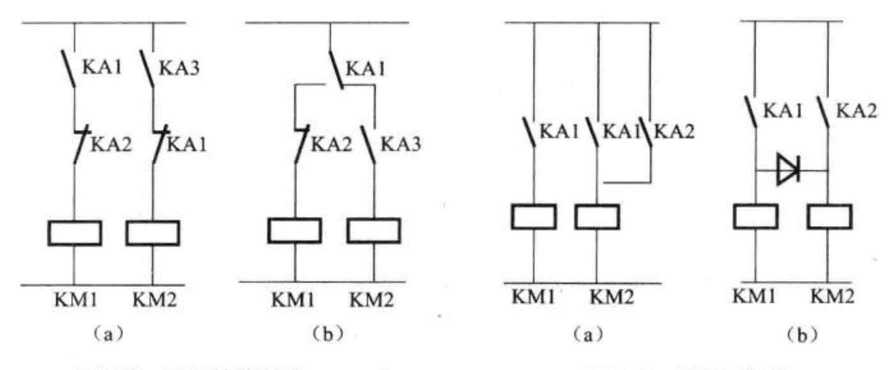


图 6-8 利用转换触头

图 6-9 利用二极管

④ 利用逻辑代数对控制电路进行化简。

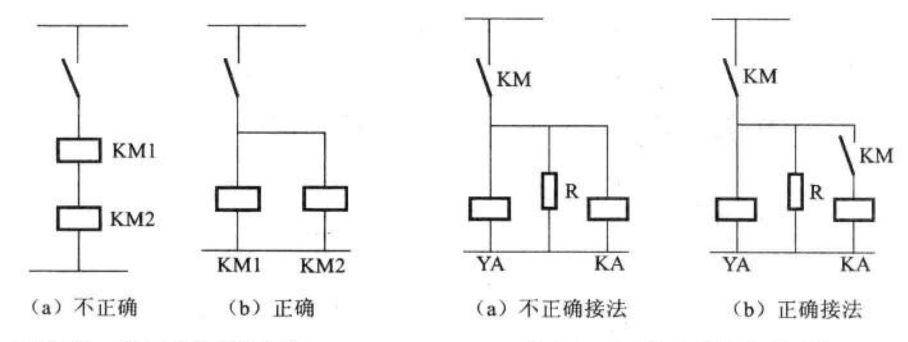
(3) 尽量减少电气元件不必要的通电时间。在正常工作时，长时间不起控制作用的电气元件，应尽量减少其通电时间，以节约电能和延长该电气元件的寿命。

(4) 力求控制电路安全可靠

① 正确连接电气元件的线圈

如图 6-10 所示，交流电气元件的线圈不能串联使用，若两个元件需要同时动作，其线圈应该并联连接。即使两个线圈的额定电压之和等于外加电压，也不允许串联使用。因为即使 KM1 和 KM2 是相同型号的接触器，其吸合时间也是有差别的，当其中一个接触器先吸合动作后，该接触器的线圈阻抗要比未吸合接触器的阻抗大，而每个线圈上分配到的电压与线圈阻抗成正比，因此，会使另一个接触器的线圈电压因达不到额定电压而不吸合，同时线圈支路电流因两个接触器的起动功率而增加，会引起线圈烧毁。

图 6-11(a)所示的直流控制电路中，直流电磁铁 YA 的线圈电感量较大，直流中间继电器 KA 的线圈电感量较小。当触头 KM 断开时，由于 YA 的线圈电感量较大，产生的感应电动势加在 KA 的线圈上，并形成回路。若流经 KA 线圈的感应电流大于其工作电流，则 KA 将继续保持吸合，且要经过一段时间后 KA 才释放，这种情况是不允许的。为此，如图 6-11(b)所示，应在 KA 的线圈支路上单独串联一个常开触头 KM。



(a) 不正确　(b) 正确

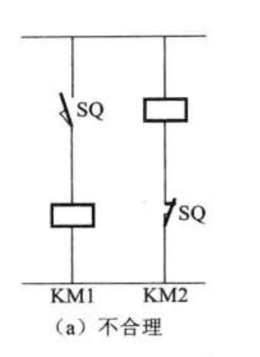
图 6-10　线圈不能串联连接

(a) 不正确接法　(b) 正确接法

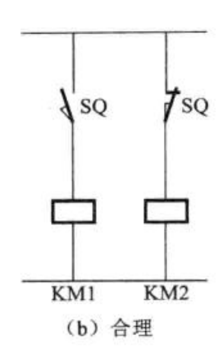
图 6-11　两电感量相差悬殊的直流电压线圈的连接

② 正确连接电器触点

如图 6-12(a)所示，同一电气元件的常开触头和常闭触头在该元件的实物中靠得很近，若分别接在电源不同的相线上，当触点断开时会产生电弧，引起短路。



(a) 不合理

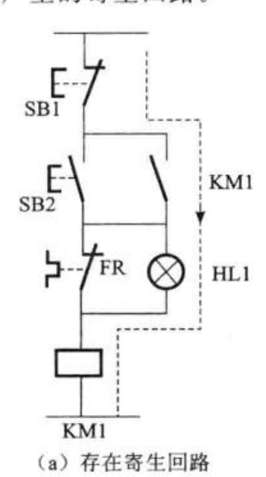


(b) 合理

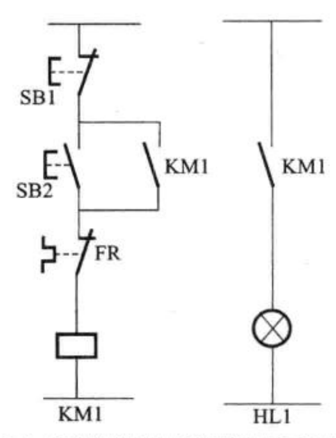
图 6-12 触头正确连接

③ 避免在控制电路中出现寄生回路

在控制电路的动作过程中，意外接通的电路称为寄生回路。如图 6-13(a)所示的电路，在正常工作时，能满足所需功能，但在电动机过载而使 FR 触头断开时，便会出现图中虚线所示的寄生电路，使 KM1 不能可靠释放，无法起到保护作用。图 6-13(b)为修改后的电路，将信号指示电路单独画出，就可避免因指示灯而产生的寄生回路。



(a) 存在寄生回路

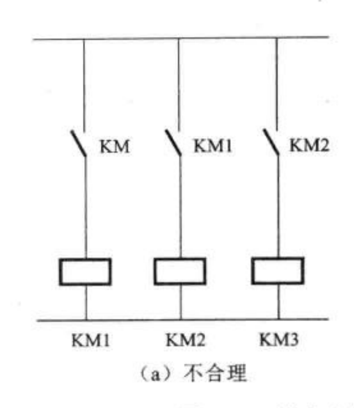


(b) 正确的控制电路及信号指示电路

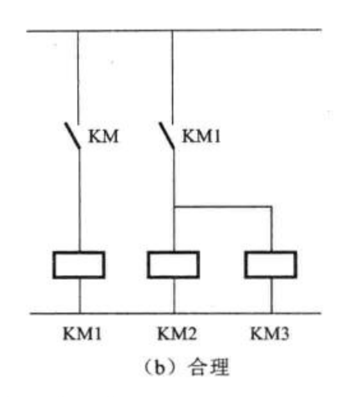
图 6-13 防止寄生回路

④ 应尽量避免许多电气元件依次动作才能接通另一电气元件的现象

如图 6-14(a)所示，线圈 KM3 的通电要经过 KM1 和 KM2 依次动作后才能实现；改为图 6-14(b)后，只需 KM1 接通后就可实现 KM3 的动作，可靠性更高。



（a）不合理



（b）合理

图 6-14　避免电气元件依次通电现象

⑤ 避免发生触点"竞争"与"冒险"现象

在分析控制电路的动作过程时，通常对触点的接通和断开都是静态分析，即没有考虑触点的动作时间。实际上，由于电磁线圈的电磁惯性及触点机构的机械惯性等因素，触点在接通和断开过程中，总存在一定的固有时间（几十毫秒到几百毫秒），这是电磁开关元器件的固有特性。

在设计电气控制电路时，若未考虑电气元器件固有的通断时间，则可能会发生触点争先吸合从而使控制电路不按预定时序动作的情况，这种现象称为电路的"竞争"。另外，由于电气元器件固有的释放延时特性，也会出现开关器件不按时序要求动作的可能性，这种现象称为"冒险"。"竞争"与"冒险"现象都会造成控制回路不能按要求时序动作，从而引起系统误动作，可能直接危及人机安全，设计时要注意避免发生这些现象。

如图 6-15(a)所示控制电路的通常静态分析如下，按下 SB2，通电延时继电器 KT 线圈得电并自锁，经过 KT 所设定的延时时间之后，其延时断开常闭触点断开，KT 线圈断电，瞬时常开触点恢复断开，延时断开常闭触点恢复闭合。但以上分析过程未考虑触点动作的固有时间，若 KT 的延时断开常闭触点闭合的动作时间为 t_1，瞬时常开触点断开的动作时间为 t_2。在 KT 的延时时间到时，延时断开常闭触点断开，KT 线圈断电。当 $t_1>t_2$ 时，在延时断开常闭触点未闭合时，瞬时常开触点已断开，电路能正常实现 KT 线圈的断电功能；当 $t_1<t_2$ 时，在瞬时常开触点未断开时，延时断开常闭触点已闭合，KT 线圈将再次通电，无法实现 KT 线圈断电，这就是触点"竞争"与"冒险"现象。为避免发生这种现象，如图 6-15(b)所示，应增加中间继电器 KA。

（5）尽量减少实际连线数量

在设计控制电路时，要特别注意电气柜、操作台以及行程开关之间的连接

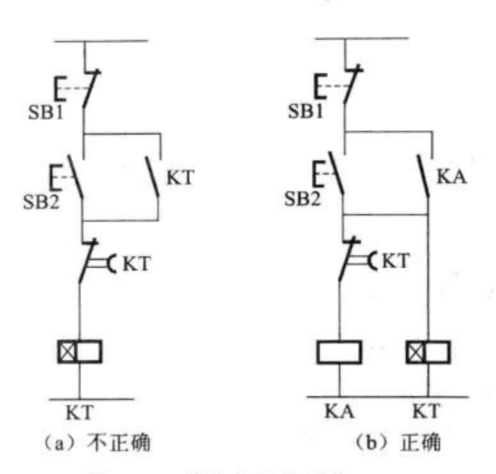


图 6-15 竞争与冒险现象

线。因为按钮安装在操作台上，接触器等元件安装在电气柜内，行程开关安装在机器上，这样就需要由电气柜二次引出连接线到操作台的按钮上或机器的行程开关上。如图 6-16(a)所示，起动按钮 SB2 与停止按钮 SB1 直接连接，只需 3 根引出线，而图 6-16(b)由于连接的不合理，需要 4 根引出线。

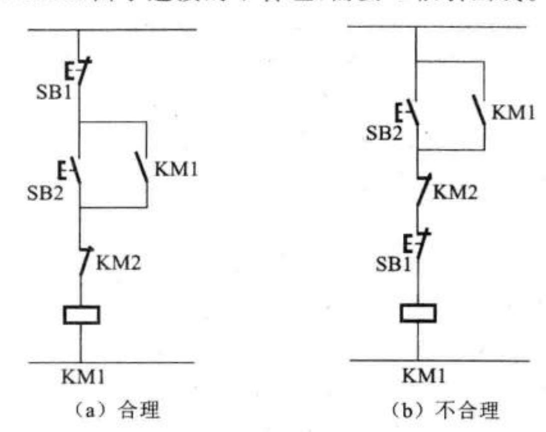


图 6-16 实际连线

6.3.4 控制电路的经验设计法

电气控制设计的基本方法有经验设计法和逻辑设计法两种。

所谓经验设计法，就是根据生产工艺的要求，按照电动机的控制方法，利用基本控制环节或典型电路进行设计。其设计的基本步骤为主电路→控制电路

→辅助电路→互锁与保护→总体检查，然后进行反复修改与完善，逐步实现其全部控制功能。这里的辅助电路指的是包括短路、过载、超程、零压、光电测试等各种保护环节及信号指示与照明电路。

该设计方法简单易行、使用广泛。但对于比较复杂的电路，要求设计人员有一定的经验，并且由于设计过程是逐步完善的，一般不易获得最佳设计方案，所以最终的设计方案一般需要进行实验验证。

有关经验设计法的实例，请参见本章后面的“电气控制系统设计举例”章节。

6.3.5 控制电路的逻辑设计法

逻辑设计法是利用逻辑代数这一数学工具来进行控制电路的设计。将控制电路中的接触器和继电器等元件线圈的通电与断电、触头的闭合与断开以及主令元件触头的接通与断开等，均看成逻辑变量，根据生产工艺要求，将这些逻辑变量的关系表示为逻辑函数关系式，再运用逻辑函数基本公式等对逻辑函数关系式进行化简，然后由化简的逻辑函数式画出相应的电气原理图，最后再进一步地检查、化简和完善，以获得既满足工艺要求又经济合理的最佳设计方案。

逻辑电路有组合逻辑电路和时序逻辑电路两种基本类型，其设计方法也各不相同。

1. 组合逻辑电路设计

组合逻辑电路执行元件的输出状态只与同一时刻控制元件的状态相关，输入与输出呈单向关系，即输出量对输入量无影响。其设计方法比较简单，可以作为经验设计法的辅助和补充，用于简单控制电路的设计，或对某些局部电路进行化简，进一步节省并合理使用电气元件与触头。

组合逻辑电路的设计步骤为：根据生产工艺要求，确定逻辑变量→列出控制元件与执行元件的动作状态表→写出执行逻辑表达式→简化逻辑表达式→绘制控制电路图。该设计方法的举例说明如下。

设计要求：某电动机只有在继电器 KA1、KA2、KA3 中任何一个或两个动作时才能运转，而在其他条件下都不运转，该电动机由接触器 KM 的主触头进行通断电控制，试设计其控制电路。

设计步骤如下。

(1) 确定逻辑变量。

输入逻辑变量：KA1、KA2、KA3。

输出逻辑变量：KM。



(2) 列出控制元件与执行元件的动作状态表，如表 6-8 所示，其中，“1”表示元件动作，“0”表示元件不动作。

表 6-8 状态表

KA1	KA2	KA3	KM
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

(3) 根据表 6-8 写出 KM 为 1 的逻辑代数式。

$$
\begin{aligned}
KM = & \overline{KA1} \cdot \overline{KA2} \cdot KA3 + \overline{KA1} \cdot KA2 \cdot \overline{KA3} + \overline{KA1} \cdot KA2 \cdot KA3 \\
& + KA1 \cdot \overline{KA2} \cdot \overline{KA3} + KA1 \cdot \overline{KA2} \cdot KA3 + KA1 \cdot KA2 \cdot \overline{KA3}
\end{aligned}
$$

(4) 利用逻辑代数基本公式化简为最简“与或”式。

$$
\begin{aligned}
KM = & \overline{KA1}(\overline{KA2} \cdot KA3 + KA2 \cdot \overline{KA3} + KA2 \cdot KA3) \\
& + KA1(\overline{KA2} \cdot \overline{KA3} + \overline{KA2} \cdot KA3 + KA2 \cdot \overline{KA3}) \\
= & \overline{KA1}[\overline{KA2} \cdot KA3 + KA2(\overline{KA3} + KA3)] \\
& + KA1[\overline{KA2}(\overline{KA3} + KA3) + KA2 \cdot \overline{KA3}] \\
= & \overline{KA1}(\overline{KA2} \cdot KA3 + KA2) + KA1(\overline{KA2} + KA2 \cdot \overline{KA3}) \\
= & \overline{KA1}(KA3 + KA2) + KA1(\overline{KA2} + \overline{KA3})
\end{aligned}
$$

(5) 根据化简后的逻辑表达式，绘制控制电路图，如图 6-17 所示。

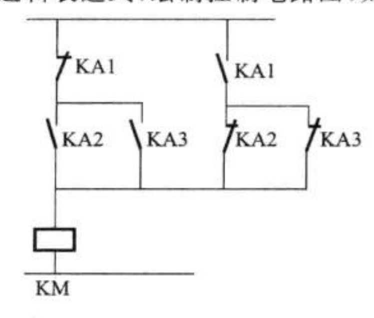


图 6-17 控制电路

2. 时序逻辑电路设计

时序逻辑电路的特点是输出状态不仅与同一时刻的输入状态有关，而且还与输出量的原有状态及其组合顺序有关，即输出量通过反馈作用，对输入状态产生影响。进行这种逻辑电路设计时，要设置记忆元件（如中间继电器等），记忆输入信号的变化。其设计过程比较复杂，基本步骤如下。

（1）根据拖动要求，先设计主电路，明确各电动机及执行元件的控制要求，并选择产生控制信号（包括主令信号和检测信号）的主令元件（如按钮、控制开关、主令控制器等）和检测元件（如行程开关、压力开关、速度继电器、过电流继电器等）。

（2）根据工艺要求作出工作循环图，并列出主令元件、检测元件以及执行元件的状态表，写出各状态的特征码（一个以二进制表示一组状态的代码）。

（3）为区分所有状态（重复特征码）而增设必要的中间记忆元件（中间继电器）。

（4）根据已区分的各种状态的特征码，写出各执行元件（输出量）与中间继电器、主令元件及检测元件（逻辑变量）间的逻辑关系式。

（5）化简逻辑表达式，据此绘出相应的控制电路。

（6）检查并完善设计电路。

由于这种设计方法难度较大，整个设计过程较复杂，在一般常规设计中很少单独采用，其具体设计过程可参阅有关资料，这里不再作进一步介绍。

6.4 电气控制系统的工艺设计

工艺设计的目的是为了满足电气控制设备的制造和使用要求。在完成电气原理图设计及电气元件选择之后，就可以进行电气控制设备的总体配置，即总装配图和总接线图的设计，然后再设计各部分的电气装配图与接线图，并列出各部分的元件目录、进出线号以及主要材料清单等技术资料，最后编写使用说明书。

6.4.1 电气设备的总体布置

由于各种电气元件的作用不同，所以它们在电气设备上的装配位置也不

同。例如电动机、各种执行元件(如电磁铁、电磁阀、电磁离合器等)以及各种检测元件(如行程开关、传感器等)必须安装在生产机械的相应部位,各种控制元件(如接触器、继电器、自动开关等)、保护元件(如熔断器、电流或电压保护继电器等)可以安装在单独的控制柜内,而各种控制按钮、控制开关、各种指示灯、指示仪表、需经常调节的电位器等,则必须安装在控制台的面板上。由于各种电气元件安装位置不同,在构成一个完整的自动控制系统时,必须划分组件,同时要解决组件之间、控制柜之间以及控制柜与被控装置之间的连线问题。划分组件的原则如下。

(1) 将功能类似的元件组合在一起。如用于操作的各类按钮、开关、键盘、指示灯以及检测、调节等元件集中为控制面板组件;各种继电器、接触器、熔断器和照明变压器等控制元件集中为电气板组件;各类控制电源、整流以及滤波元件等集中为电源组件。

(2) 尽可能减少组件之间的连线数量,将接线关系密切的控制元件置于同一组件中。

(3) 强弱电控制器分开,以减少干扰。

(4) 力求整齐美观,将外形、尺寸、重量相近的电气元件组合在一起。

(5) 为了便于检查与调试,将需经常调节、维护和易损的元件组合在一起。

电气控制设备的各部分及组件之间的接线方式通常有以下几种。

(1) 电气板、控制板、设备电气元件的进出线一般采用接线端子(按电流大小及进出线数选用不同规格的接线端子)。

(2) 控制柜与被控制设备或控制柜之间采用多孔插接件,便于拆装和搬运。

(3) 印制电路板及弱电控制组件之间宜采用各类标准插接件。

总体配置设计是以电气系统的总装配图和总接线图的形式来表达的,图中应以示意形式反映出各部分主要组件的位置及各部分的接线关系、走线方式、使用管线要求和电缆编号等内容。总体设计要使整个系统集中、紧凑,同时在场地允许的条件下,对发热厉害、噪声振动大的电气部件,如电动机、起动电阻箱等,应尽可能放在远离操作者的地方或隔离起来。操作台应置于操作方便、便于综观全局的位置。总电源紧急停止控制开关应安放在方便操作且明显的位置。总体配置设计合理与否将影响到电气控制系统工作的可靠性,并关系到电气系统的制造、装配质量和调试以及操作和维护的方便性。

6.4.2 绘制电气元件的布置图

电气元件布置图是某些电气元件按一定原则组合后的布局表达,主要表明

电气设备上所有电气元件的实际位置，为电气设备的安装及维修提供必要的资料。例如电气控制柜中的电气板、控制面板、放大器等的布置。电气元件布置图的设计依据是电气控制原理图，图中不需标注尺寸，但是各电气元件代号应与有关图纸和器件清单上的元器件代号相同，在图中往往留有10%以上的备用面积及导线管（槽）位置，以供改进设计时用。

对同一组件中电气元件的布置应遵循以下原则。

(1) 一般监视器布置在控制柜的仪表板上，测量仪表布置在仪表板上部，指示灯布置在仪表板下部。

(2) 体积大或较重的电气元件应安装在控制柜电气板的下方，发热元件安装在电气板的上方；对发热量大的元件，必须隔离安装，必要时可采取风冷。

(3) 强弱电分开安装，并注意屏蔽，以提高抗干扰能力。

(4) 布置元器件时，应留出布线、接线、维修和调整操作的空间间距。

(5) 电气元件的布置应考虑整齐、美观和对称，尽量使外形与结构尺寸相同的电气元件安装在一起，以便于加工、安装和配线。

一般可通过实物排列来确定各电气元件的位置，进而绘制出控制柜的电气元件布置图。

6.4.3 绘制电气控制系统的接线图

电气元件接线图是根据电气原理图和电气元件布置图进行绘制的。它表示成套设备的连接关系，是电气安装与查线的依据。接线图应按以下要求绘制。

(1) 接线图和接线表的绘制应符合国家标准《电气制图接线图和接线表》中的规定。

(2) 在接线图中，各电气元件的相对位置要与实际安装的相对位置一致。

(3) 所有电气元件及其接线座的标注要与电气控制电路图中标注相一致，应采用同样的文字符号及线号。

(4) 接线图与电气控制电路图不同，接线图应将同一电气元件中的各部件（如线圈、触点等）画在一起，并用细实线框入。

(5) 全图一律用细线条绘制，应清楚地表示出各电气元件的接线关系和接线去向，走向相同的多根导线可用单线表示。

(6) 接线图中应清楚地标注配线用的各种导线的型号、规格、截面积、颜色以及穿线管的尺寸。

(7) 控制电路和信号电路进入控制柜的导线超过10根时，必须提供端子板



或连接器件，动力电路和测量电路可以直接连接到电气设备的端子上。

(8) 端子板上各接点按接线号顺序排列，并将动力线、交流控制线、直流控制线分类排开。

(9) 对于板后配线的电气接线图，其电气元件应按控制板翻转后的方位绘制，以便施工、配线，但触点方向不能倒置。

6.4.4 控制电路常用配线方式

元器件布置完成后，各元器件之间需要用导线连接起来才能完成原理图所设计的功能，根据导线走线方式的不同，可以将控制电路的配线方式分为三类，具体如表 6-9 所示。

表 6-9 常用配线方式

配线方式	适用场合	优点	缺点	所需施工员
板前敞开配线	用于电气系统比较简单、电气元件较少的情况，对控制板或配电盘进行配线	(1)直观 (2)便于查找线路 (3)维护检修方便	(1)必须采用单芯硬导线连接 (2)工艺较为复杂 (3)需要技术熟练的工人 (4)走线占地面积大，导线需用量大	只需一个配线工
板后交叉配线	用于电气系统比较复杂、电气元件较多的情况，对控制板或控制柜进行配线	(1)外观排列整齐、美观 (2)省导线，走线面积小 (3)结构紧凑 (4)施工方便 (5)工艺性能好	(1)需要增加穿线板结构 (2)连接线交叉太多，对弱电线路会产生干扰，所以仅适用于强电控制系统的接线 (3)仅适用于小批量生产，使用较少	配线、查找线需两人
板前行线槽配线	各种场合均适用	(1)便于施工走线，查找、维护、检修方便 (2)工艺性好，配线操作容易 (3)可用软导线配线 (4)适于大批量生产，应用比较广泛	(1)增加行线槽结构 (2)走线占地面积较大，导线需用量较多	只需一个配线工

6.4.5 各类元件及材料清单的汇总

在电气控制系统原理设计及工艺设计结束之后，应根据各种图纸，对电气控制系统所需要的各种元件及材料进行综合统计，按类别列出外购件汇总清单表、标准件清单表、主要材料消耗定额表及辅助材料消耗定额表，以便采购人员、生产管理部门按制造需要备料，做好制造准备工作。这些材料也是成本核算的主要依据。

6.4.6 编写设计说明书及使用说明书

新型设备的设计制造中，电气控制系统的投资占有很大比重，同时控制系统对生产机械运行的可靠性、稳定性起着重要作用，因此在投入生产前，要经过严格的审核。为了确保生产设备达到设计指标，设备制造完成后，还要经过仔细的调试，使设备运行处于最佳状态。设计说明书及使用说明书是设计审定及调试、使用和维护过程中必不可少的技术资料。

设计及使用说明书应包含以下主要内容：

(1) 拖动方案选择依据及本设计的主要特点；

(2) 主要参数的计算过程；

(3) 设计任务书中要求的各项技术指标的核算与评价；

(4) 设备调试要求及调试方法；

(5) 使用和维护的要求及注意事项。

6.4.7 检查与调试

经过设计和组装环节之后，电气控制系统需经过系统的检查与调试，才能投入生产运行。

(1) 对于刚刚组装完成的机械电控系统，在初次上电之前首先要检查的内容如下。

① 各种需要的技术文件是否齐全、是否无差错。主要检查控制系统的原理图、布置图、接线图、元件表等文件是否完善，这些文件将是系统调试与检查的指导文件。

② 各个电气元件安装是否正确和牢靠，接线是否正确。

③ 各种安全保障措施是否齐全，主要检查屏蔽、防护和接地措施是否到位。

(2) 初次上电时，为消除可能出现的故障或未知因素带来的影响，需按步骤进行检查和调试。

① 电控系统本体上电检查。将电控系统与执行元件之间的连线断开，仅对电控系统自身上电，逐项检查现场检测元件、传感器、操作开关以及按钮等各项输入信号是否到位。按下操作按钮或开关，检查相应的接触器或继电器等是否正确动作。

② 控制系统空载检查。将执行元件接入电控系统，同时把执行元件所带动的机械部件脱开，模拟实际操作过程，观察控制系统和执行元件是否能正常工作。

③ 控制系统带载检查。将执行元件与所带机械接上，依手动运行、单步运行、单周期运行和自动运行的顺序，观察整个机械的运行情况。

④ 检查控制电路能否满足生产的各种功能。试加工一个样件，全方位检查控制系统是否满足了生产机械的各种控制要求。

6.5 电气控制系统设计举例

CW6163 型卧式车床是一种应用广泛的普通小型车床，其车削工件最大直径为 630 mm、最大长度为 1500 mm。

6.5.1 电气系统控制要求

1. 电气系统控制要求

通过对 CW6163 型卧式车床的结构特点和控制要求进行分析，其控制要求如下：

(1) 主轴运动和进给运动由一台主电动机集中拖动；

(2) 主轴运动的正反转依靠两组机械式摩擦片离合器来实现(满足螺纹加工要求)；

(3) 主轴的制动要求采用液压制动器；

(4) 需监视主轴的工作电流，这样可根据电动机的工作情况，调整切削用量，从而使电动机尽量满载运行，以提高生产效率；

(5) 由于机床较大，为了操作方便，要求主轴的起停有两地控制；

(6) 由于加工工件的最大长度较长，为了减少辅助工时，需配备一台刀架快速移动电动机；

(7) 车削时会产生高温,需配备一台冷却泵电动机;

(8) 进给运动的纵向(左右)运动、横向(前后)运动以及快速移动由一个操作手柄控制;

(9) 需要配备一套局部照明装置以及电源和主轴工作状态指示灯。

2. 电动机配置

根据前面所述的电气控制要求,该机床需配备3台电动机。电动机的功率、转速及型号等参数在机械设计时选定。3台电动机的参数如下:

(1) 主轴电动机M1:型号为Y160M-4的三相笼型感应电动机,额定功率11 kW,额定电压380 V,额定电流22.6 A,额定转速1460 r/min;

(2) 冷却泵电动机M2:型号为JCB-22的三相笼型感应电动机,额定功率0.125 kW,额定电压380 V,额定电流0.43 A,额定转速2790 r/min;

(3) 快速移动电动机M3:型号为Y90S-4的三相笼型感应电动机,额定功率1.1 kW,额定电压380 V,额定电流2.7 A,额定转速1400 r/min。

6.5.2 电气控制电路设计

1. 主电路设计

电路所需的380 V三相交流电源由隔离开关QS引入。

1) 主电动机M1部分

虽然M1功率较大,但车削是在机床起动以后才进行,且主轴的正反转是通过机械方式实现的,所以M1可采用直接起动控制方式,由接触器KM1进行控制;M1的过载保护由热继电器FR1实现;主电路中串联交流电流表PA(安装于操作面板上),用以指示主轴的工作电流;M1的短路保护由机床前一级配电箱中的熔断器来实现。由此可设计出主电动机M1部分的主电路,如图6-18所示。

2) 冷却泵电动机M2和快速移动电动机M3部分

由于电动机M2和M3的功率较小,额定电流分别为0.43 A和2.7 A,为了节省成本,可分别用交流中间继电器KA1和KA2(额定电流都为5 A)进行控制;由FR2实现冷却泵电动机M2的过载保护,由于快移电动机M3短时工作,故不设过载保护;用熔断器FU1对电动机M2和M3共同进行短路保护。这样就可得到M2和M3的主电路,如图6-18所示。

2. 控制电路设计

控制电路设计过程中,首先针对控制对象设计局部控制电路,然后依据各局部电路之间的相互关系,将局部电路连接为完整电路。由设备控制要求分析

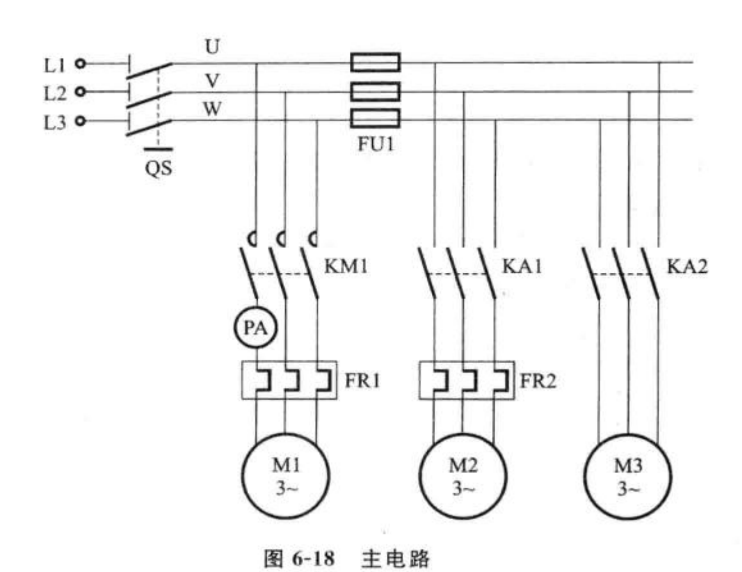


图 6-18 主电路

可知，控制电路可分为主电动机控制、冷却泵电动机与快速移动电动机控制、信号指示及照明三个局部电路。

为保证安全可靠和满足照明及指示灯的要求，控制电路的电源由控制变压器 TC 提供，其一次侧交流电压为 380 V，二次侧交流电压分别为 127 V(提供给控制电路)、36 V(提供给局部照明电路)和 6 V(提供给信号指示灯电路)。

1）主电动机 M1 的控制

可在主轴箱操作板上和刀架拖板上分别设置起动和停止按钮 SB3、SB1 和 SB4、SB2，以实现主电动机 M1 的两地控制；当冷却泵电动机 M2 过载时，M1 应及时停止工作。主电动机控制电路如图 6-19 所示。

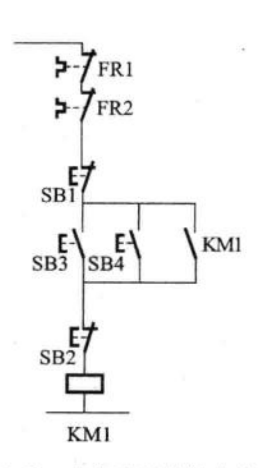


图 6-19 主电动机控制电路

2）冷却泵电动机 M2 和快速移动电动机 M3 的控制

冷却泵电动机 M2 采用中间继电器 KA1 控制的单向直接起动控制方式，由按钮 SB6 和 SB5 进行起停操作，起停按钮装在主轴箱板上；快速移动电动机 M3 采用点动控制方式，由按钮 SB7 和中间继电器 KA2 来实现，冷却泵电动机与快移电动机的局部控制电路如图 6-20 和图 6-21 所示。

3）局部照明与信号指示电路的设计

局部照明电路由交流 36 V 电源、照明灯 EL、灯开关 SA 和熔断器 FU3 组成。

根据设计要求，该机床设置两个指示灯：电源接通指示灯 HL2(绿色)，在电源开关 QS 接通以后，立即发光显示，说明机床电气线路已处于供电状态；表示主轴电动机是否运行的指示灯为 HL1(红色)。这两个指示灯 HL1 和 HL2 可分别由接触器 KM1 的辅助常开和常闭触点进行控制。所设计的信号指示与照明电路如图 6-22 所示。

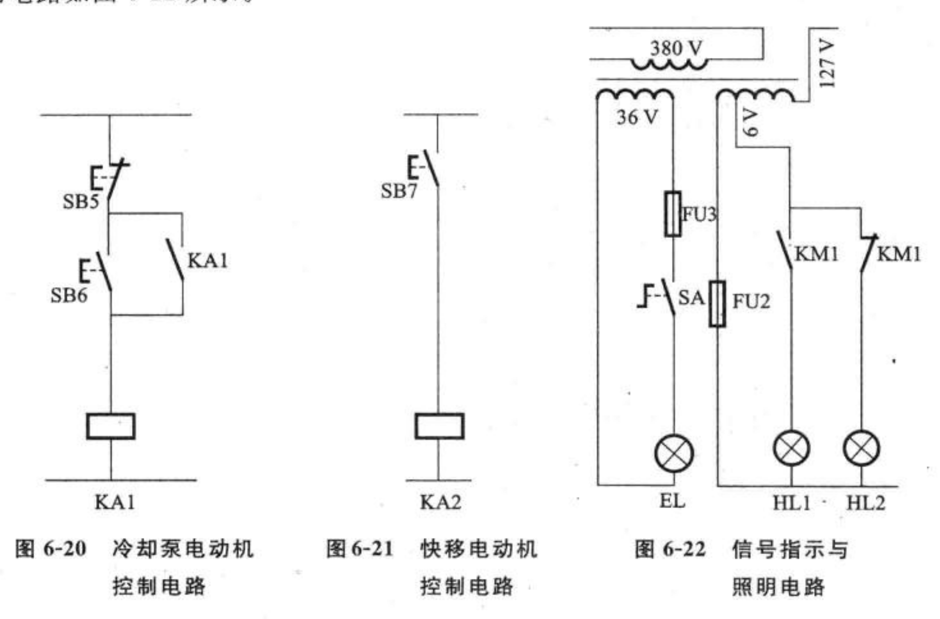


图 6-20 冷却泵电动机控制电路　图 6-21 快移电动机控制电路　图 6-22 信号指示与照明电路

4）绘制总电气原理图

由于各电动机控制部分之间无制约关系，因此总电气控制电路可直接通过连接各局部电路进行绘制，绘制出的 CW6163 型卧式车床电气原理图如图 6-23 所示。

6.5.3 选择电气元器件及制订元器件明细表

1. 电源开关的选择

电源开关 QS 主要作为电源隔离开关用，并不是用它来直接起停电动机。控制变压器二次侧所接的电气元件在变压器一次侧产生的电流相对较小，因此 QS 的选择主要考虑电动机M1、M2和M3的额定电流和起动电流。由前述可知，

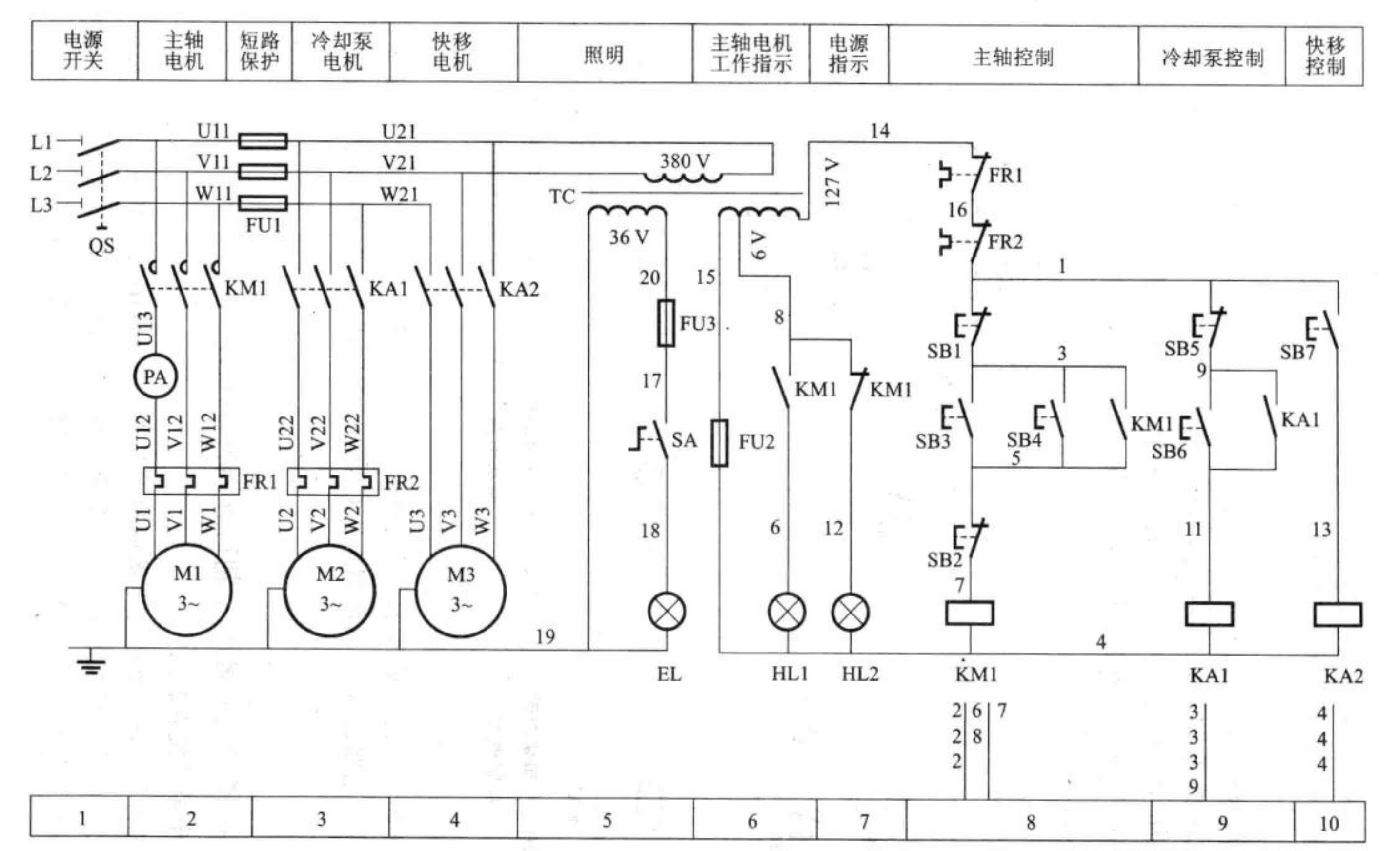


图6-23　CW6163型卧式车床电气原理

Ml、M2 和 M3 的额定电流之和为 25.73 A，由于功率最大的主轴电动机 Ml 为轻载起动，并且 M3 为短时工作，因而电源开关 QS 的额定电流选在 25 A 左右即可。可选用 HZ10-25/3 型三极组合开关，其额定电流为 25 A。

2. 接触器的选择

应根据接触器所控制负载电路的电压、电流及所需触点的数量来选择接触器。首先根据电动机的容量，计算接触器主触头的额定电流，M1 的额定功率为 11 kW、额定电压为 380 V。根据式(6-14)，接触器的额定电流 I_{ec} 为

$$I_{ec} \geqslant \frac{P_N \times 10^3}{KU_N} = \frac{11 \times 1000}{K \times 380} = 28.95 \sim 20.68 \text{ A} \quad (K = 1 \sim 1.4)$$

控制电路共需主触点三对，辅助常开触点两对，辅助常闭触点一对。查 CJ20 系列交流接触器参数表，可选择 CJ20-25 型接触器，交流三相 380 V 时，其主触点额定电流为 25 A(满足以上计算要求，且大于 M1 的额定电流 22.6 A)，可控制三相笼型感应电动机的最大功率为 11 kW，线圈电压为 127 V。该机床原来使用 CJ10-40 型，但 CJ10 系列接触器已被淘汰。

3. 电流表的选择

电流表 PA 可选用 62T2 型，其电流测量范围为 0～50 A。

4. 中间继电器的选择

由前面电路可知，KA1 需 4 对常开触头，KA2 需 3 对常开触头，故都可以选用 JZ7-44 型交流中间继电器，每个中间继电器常开和常闭触头各有 4 对，额定电流为 5 A，线圈电压为 127 V。

5. 热继电器的选择

主轴电动机 M1 的额定电流为 22.6 A，FR1 可选用 JR20-25 型热继电器，用 3T 号热元件，额定电流调节范围为 17～25 A，工作时整定电流为 22.6 A。冷却泵电动机 M2 的额定电流为 0.43 A，FR2 可选用 JR20-10 型热继电器，用 4R 号热元件，额定电流调节范围为 0.35～0.53 A，工作时整定电流为 0.43 A。该机床原来使用 JR0 系列热继电器，现已被淘汰。

6. 熔断器的选择

熔断器 FU1 对 M2 和 M3 进行短路保护，M2 和 M3 的额定电流分别为 0.43 A和 2.7 A，根据式(6-17)，熔体电流为

$$I_R \geqslant 2.5 I_{N\max} + \sum I_N = 2.5 \times 2.7 + 0.43 = 7.18 \text{ A}$$

可选用 RL1-15 型熔断器，配用 10 A 的熔断体。

FU2 和 FU3 的选择将根据控制变压器二次侧的负载电流进行。

7. 照明灯的选择

照明灯 EL 和灯开关 SA 应成套购置，EL 可选用 JC2 型，其额定电压为交流 36 V，额定功率为 40 W。

8. 信号指示灯的选择

HL1 和 HL2 都选用 AD16-22D 型 LED 信号指示灯，其额定电压为交流 6 V，额定电流为 0.035 A，分别为红色和绿色。

9. 控制变压器的选择

控制变压器的容量 P_T 可根据最大工作负载时所需要的功率来计算。CJ20-25 型接触器 KM1 线圈的起动功率为 93 VA、吸持功率为 14 VA；JZ7-44 型中间继电器 KA1 和 KA2 线圈的起动功率为 75 VA，吸持功率为 13 VA；照明灯 EL 的功率为 40 W；指示灯 HL1 和 HL2 的功率为 0.21 W。根据式(6-18)可得：

$$P_T \geqslant K_T \sum P_{XC} = 1.25(13\times 2 + 14 + 40 + 0.21\times 2) = 100.525\ \text{VA}$$

因此可选用 BK-100(100 VA)型控制变压器，其一次侧电压/二次侧电压为 380 V/127 V-36 V-6 V。可计算得 KM1、KA1、KA2 线圈电流及 HL1、HL2 电流之和小于2 A，EL 的电流也小于 2 A，故熔断器 FU2 和 FU3 均选 RC1-15 型或 RL1-15 型，熔体为最小等级的 2 A。

10. 按钮的选择

根据所需的触点数目、动作要求、使用场合、颜色等进行按钮的选择。本设计中的按钮可选 LA39-A1 型，其中 3 个起动按钮 SB3、SB4 和 SB6 的颜色为绿色；3 个停止按钮 SB1、SB2 和 SB5 的颜色为红色；点动按钮 SB7 的颜色为黑色。

综上所述，CW6163 型卧式车床的电气元器件明细表如表 6-10 所示。

表 6-10　CW6163 型卧式车床电气元器件

序号	符　号	名　称	型　号	规　格	数量
1	M1	主轴电动机	Y160M-4	11 kW，380 V，22.6 A，1460 r/min	1
2	M2	冷却泵电动机	JCB-22	0.125 kW，380 V，0.43 A，2790 r/min	1
3	M3	快速移动电动机	Y90S-4	1.1 kW，380 V，2.7 A，1400 r/min	1
4	QS	隔离开关	HZ10-25/3	三极，500 V，25 A	1
5	KM1	交流接触器	CJ20-25	25 A，线圈电压 127 V	1

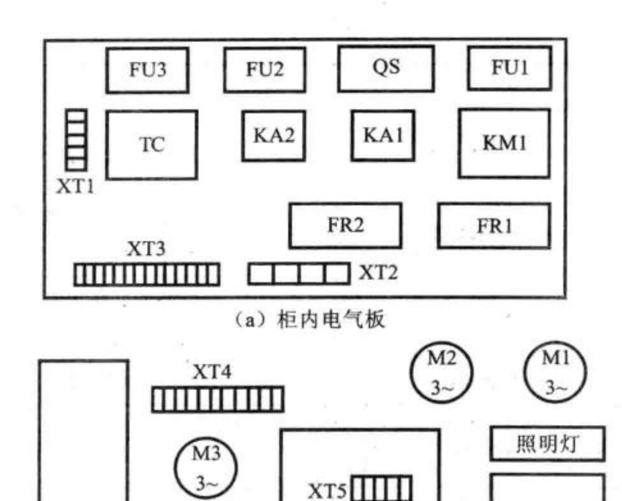
续表

序号	符　号	名　称	型　号	规　格	数量
6	KA1、KA2	交流中间继电器	JZ7-44	5 A,线圈电压 127 V	2
7	FR1	热继电器	JR20-25	热元件额定电流 25 A;整定电流22.6 A	1
8	FR2	热继电器	JR20-10	热元件额定电流 0.53 A,整定电流0.43 A	1
9	FU1	熔断器	RL1-15	500 V,熔体 10 A	3
10	FU2、FU3	熔断器	RC1-15 或 RL1-15	500 V,熔体 2 A	2
11	TC	控制变压器	BK-100	100 VA, 380 V/127 V-36 V-6 V	1
12	SB3、SB4、SB6	起动按钮	LA39-A1	5 A,绿色	3
13	SB1、SB2、SB5	停止按钮	LA39-A1	5 A,红色	3
14	SB7	点动按钮	LA39-A1	5 A,黑色	1
15	HL1	指示灯	AD16-22D	6 V,绿色	1
16	HL2	指示灯	AD16-22D	6 V,红色	1
17	EL、SA	照明灯及灯开关	JC2	36 V,40 W	1
18	PA	交流电流表	62T2	0～50 V,直接接入	1

6.5.4 绘制电气元器件布置图和电气安装接线图

电气元器件布置图是元器件的安装依据,应根据电气原理图对元器件进行合理布局,要尽可能使连接导线最短、导线交叉最少。CW6163 型卧式车床的元器件安装底板有 3 块,分别为控制柜内电气板、床头操作显示面板以及刀架拖动操作板。其电气元器件布置如图 6-24 所示,图中 XT1～XT5 为接线端子。

元器件布置图完成之后,再根据电气安装接线图的绘制原则,绘制电气安装接线图。CW6163 型卧式车床的电气安装接线图如图 6-25 所示。电气接线图中的管内敷线明细表如表 6-11 所示。



（a）柜内电气板

（b）床头操作显示面板 （c）刀架拖动操作板 （d）刀架快速按钮

图 6-24 CW6163 型卧式车床电气元器件布置图

表 6-11 CW6163 型卧式车床电气接线图中管内敷线明细表

代号	穿线用管（或电缆类型）内径（mm）	电线 截面（mm^2）	电线 根数	接线号
#1	内径 15 聚氯乙烯软管	4	3	U1，V1，W1
#2	内径 15 聚氯乙烯软管	4	2	U12，U13
		1	8	1，3，4，5，6，9，11，12
#3	内径 15 聚氯乙烯软管	1	13	U2，V2，W2，U3，V3，W3，1，3，5，7，13，17，19
#4	G3/4（in）螺纹管			
#5	内径 15 金属软管	1	10	U3，V3，W3，1，3，5，7，13，17，19
#6	内径 15 聚氯乙烯软管	1	8	U3，V3，W3，1，3，5，7，13
#7	18 mm^2、16 mm^2 铝管			
#8	内径 11 金属软管	1	2	17，19
#9	内径 8 聚氯乙烯软管	1	2	1，13
#10	YHZ 橡套电缆	1	3	U3，V3，W3

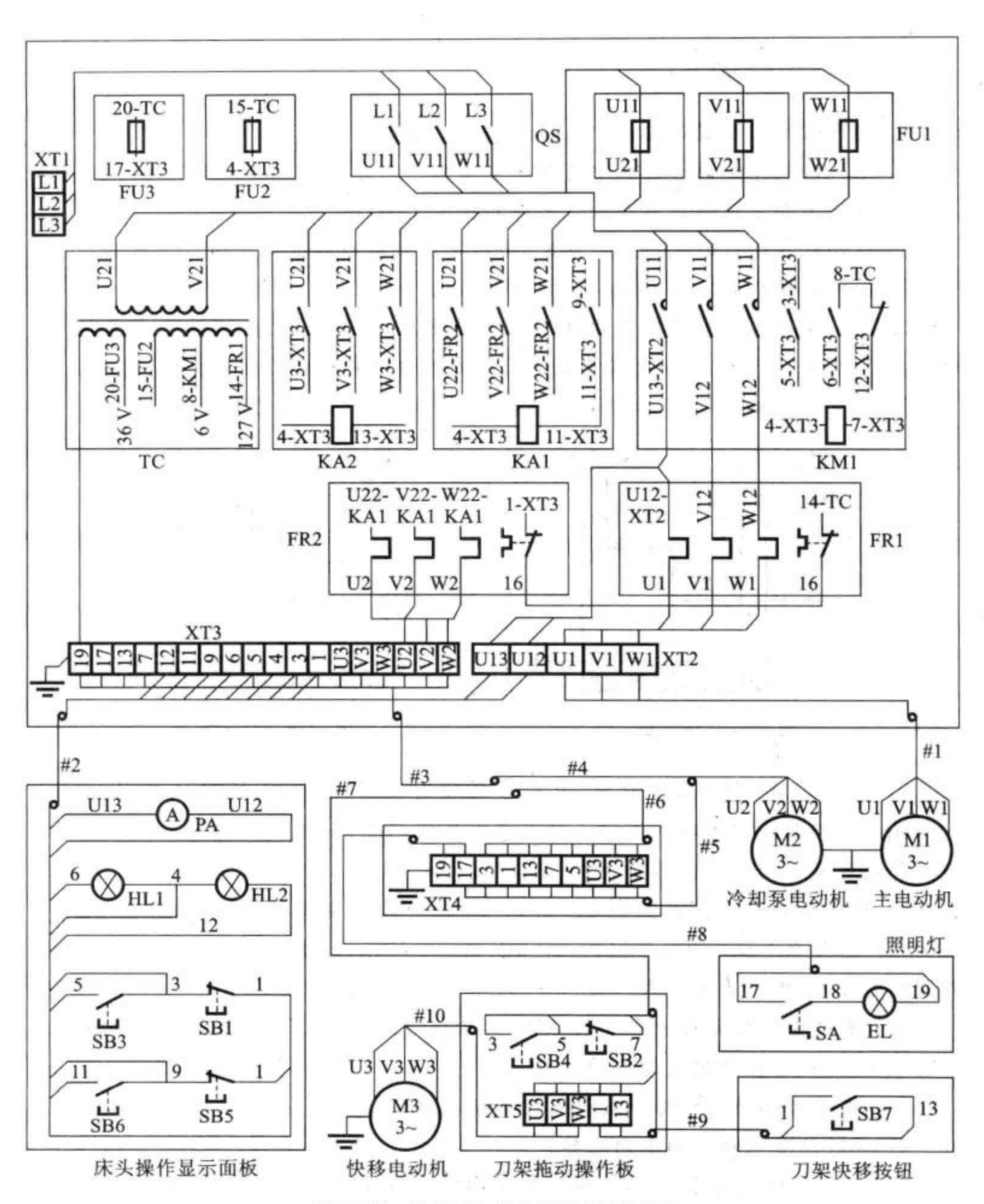


图 6-25 CW6163 型车床安装接线图





思考与练习

1. 电气控制系统设计过程中应当遵循哪些基本原则？

2. 电气控制系统设计过程中有哪些主要工作内容？

3. 电气控制系统设计有哪些应完成的技术文件？

4. 电动机在运行时，其电压、电流、功率及温升能否超过额定值？为什么？

5. 选择电动机的容量时，主要考虑哪些因素？

6. 有一生产机械的实际负载转矩曲线如图 6-26 所示，生产机械要求的转速 $n_N=1450$ r/min，试选一台容量合适的交流电动机来拖动此生产机械。

7. 一生产机械的负载曲线如图 6-27 所示，试选择电动机的容量。

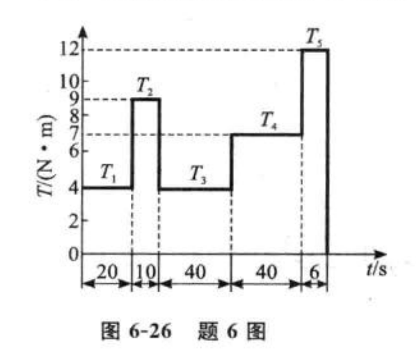


图 6-26　题 6 图

图 6-27　题 7 图

8. 有一台 35 kW、工作时间 30 min 的短时工作电动机，欲用一台 $T_h=$ 90 min的长期工作制电动机代替。若不考虑其他问题（如过载能力等），试问长期工作制电动机的容量应选多大？

9. 暂载率 ε 表示什么？当 $\varepsilon=15\%$ 时，能否让电动机工作 15 min、休息 85 min？为什么？试比较 $\varepsilon=15\%$、30 kW 和 $\varepsilon=40\%$、20 kW 两个重复短时工作制的电动机，哪一台容量大一些？

10. 有一生产机械的功率为 10 kW，其工作时间 $t_p=0.72$ min，停车时间 $t_0=2.28$ min，试选择所用电动机的容量。

11. 由两台电动机拖动一生产机械设备，设计要求如下：

(1) M1、M2 电动机均单向运转；

(2) M1 电动机起动工作，机械机构移动到位后，M2 电动机才能开始工作；

(3) M2 电动机带动另一机械机构移动到位后自动停机，M1 电动机运行 t 时间后停机；

(4) 具有紧急停机功能及必要的保护环节；

(5) 设计主电路和电气控制电路。

12. 由两台电动机拖动一台机械设备，设计满足下列要求的电气原理图：

(1) M1 电动机正、反向运转，M2 电动机单向运转；

(2) M1 电动机起动运行 t 时间后，M2 电动机才能起动；

(3) M1、M2 电动机同时停机，若其中一台电动机过载，另一台电动机也应停机；

(4) 具有必要的保护环节；

(5) 画出主电路和控制电路。

13. 试设计某专用机械设备的电气控制电路，画出电气原理图，并制订电气元件明细表。该设备用于镗某一零件前后孔，其加工工艺是：快进→工进→快进→工进→快退→停止。此设备采用三台电动机，其中 M1 为主运动电动机，容量为 4 kW；M2 为工进电动机，容量为 2.2 kW；M3 为快速移动电动机，容量为 0.75 kW。

设计要求：

(1) 工作台除起动时采用按钮外，其他过程由行程开关自动控制，并能完成一次循环。为保证从快进到工进的准确定位，需采取制动措施；

(2) 快速电动机要求有点动调整，但在加工时不起作用；

(3) 设置紧急按钮；

(4) 应有短路、过载、限位等保护措施；

(5) 画出行程开关与行程挡块配合的位置图，述说各行程开关在各行程的状态。

其他要求应根据加工工艺由读者自行考虑。

第7章 可编程控制器及其应用

7.1 概　　述

可编程序逻辑控制器简称为 PLC(Programmable Logical Controller),早期的 PLC 是为取代继电器控制线路、完成顺序控制而设计的,它仅有逻辑运算、计时及计数等顺序控制功能,用于开关量控制。

进入 20 世纪 70 年代,随着微电子技术的发展,PLC 采用微处理器之后,这种控制器就不限于当初的逻辑运算了,还具有算术运算、数字量和模拟量的输入和输出等,功能不断增强,因而也可简称为 PC(Programmable Controller),即常称为可编程控制器或可编程序控制器,但由于与个人计算机的简称 PC 重复,为了加以区分,现在仍用以前的 PLC 简称。

PLC 是微机技术与继电器常规控制概念相结合的产物,即采用微型计算机的基本结构和工作原理、融合继电器控制的概念而构成的一种新型工业控制器,是一种典型的工业控制计算机。它是专为工业环境下的应用而设计的,它采用可编程序的存储器,用来存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作的指令,并通过数字量或模拟量的输入和输出,控制各种类型的机械或生产过程。

1969 年,美国数字设备公司(DEC)研制出世界上第一台 PLC,并在美国通用汽车公司的生产自动装配线上首次应用成功,之后得到迅速发展。美国从 1971 年开始输出这种技术,1973 年以后,德国、日本、英国、法国相继开发了各自的 PLC,并广泛应用,现在 PLC 的应用领域可谓是各行各业都有。PLC 的出现和发展,是工业控制技术的一个飞跃。需要特别指出的是,PLC 在机械行业的应用有十分重要的意义,PLC 是实现机电一体化的重要手段,它既能把传统的机械产品改造成新一代机电一体化的产品,又适应于生产过程控制。PLC 在我国机械、冶金、化工、轻工等大多数工业部门已得到了广泛应用。

7.1.1 可编程控制器的特点

为了适应工业环境下的应用，可编程控制器具有的主要特点如下。

(1) 抗干扰能力强、可靠性高。PLC 中采用大规模集成电路，在硬件和软件上均采用了很多抗干扰措施，如它的输入和输出均采取了电隔离措施、有自诊断故障等功能，故它具有很强的抗干扰能力，能在各种恶劣环境下可靠地工作。一般 PLC 的平均无故障运行时间可达几十万个小时。

(2) 通用性强。由于采用了微型计算机的基本结构和工作原理，而且接口电路考虑了工业控制的要求，输出接口能力强，因而对不同的控制对象，可以采用相同的硬件，只需编制不同的软件，就可实现不同的控制要求。

(3) 接线简单、减少了施工的工作量。由于 PLC 是采用程序来达到所要求的控制功能，而继电器控制系统是采用硬接线来达到控制要求，因此采用 PLC 控制系统，可减少接线施工的工作量。只需将用于控制的按钮、限位开关或光电开关等传感器接入 PLC 的输入端，将被控制的电磁铁、电磁阀、接触器和继电器等功率输出元件的线圈接至 PLC 的输出端，就完成了全部的输入/输出接线任务。

(4) 编程容易。一般使用与继电器控制电路原理图相似的梯形图或用面向工业控制的简单指令形式编程。因而编程语言形象直观、容易掌握，具有一定电工和工艺知识的人员可在短时间学会并应用自如。

(5) 功能完善。现代的 PLC 具有数字量和模拟量的输入和输出、逻辑和算术运算、定时、计数、顺序控制、功率驱动、通讯、网络、人机对话、自检、记录和显示接口等工业控制所需的功能或模块，因此，PLC 能完全胜任生产过程中的各种控制要求。

(6) 扩充方便，组合灵活，适应性强。对于整体式 PLC，一般有多种点数的主机及扩充模块可供选择；对于模块式 PLC，也有各种扩展模块，因而可以很方便地进行硬件组合，以适应不同工业控制需求、不同输入输出点数要求、不同输入/输出方式的系统。PLC 对生产工艺适应性强，当生产工艺发生变化时，可以不改变 PLC 的硬设备，只需改编 PLC 中的程序即可。

(7) 容量大，体积小，重量轻，功耗少，成本低，维修方便。例如一台具有 128 个输入、输出点的小型 PLC，其尺寸为(216×127×110) mm^3，重约 2.3 kg，空载功耗为 1.2 W，它可以完成相当于 400～800 个继电器组成系统的控制功能，而其成本仅相当于相同功能继电器系统的 10%～20%；PLC 一般采用模块结构，又具有自诊断功能，判断故障迅速方便，维修时只需更换插入式模块，因



而维修十分方便。

7.1.2 可编程控制器的分类

PLC 的种类很多，在功能、内存容量、控制规模以及外形方面差异较大，因此 PLC 的分类标准也不统一，但仍可按其输入/输出点数、结构形式、实现功能进行大致分类。

1. 按输入/输出点数分类

通常，PLC 输入/输出的点数是 4 或 8 的倍数。常用输入与输出点数的和来描述 PLC 的规模。

(1) 超小型 PLC。输入与输出的点数和在 64 点以下为超小型或微型 PLC，输入/输出的信号是开关量信号，实现功能以逻辑运算为主，并有计时和计数功能，其整体式结构紧凑，用户程序容量通常为 1～2 KB。这种超小型 PLC 已由整体式结构向微型模块化结构发展，以使配置更加灵活。这种经济的微型 PLC 的最小输入输出点数一般为 8～16 点，可适应单机及小型自动控制系统的需要。

(2) 小型 PLC。小型 PLC 的输入输出点数和在 64～256 之间，用户程序存储器容量为 2～4 KB。小型 PLC 的特点是体积小、结构紧凑，一般为整体式结构。除了开关量 I/O 以外，还可以连接模拟量 I/O 以及其他各种特殊功能模块。它能执行包括逻辑运算、计时、计数、算术运算、数据处理和传送、通信联网以及各种应用指令。

(3) 中型 PLC。中型 PLC 的输入、输出点数和在 256～512 之间，兼有开关量和模拟量的输入/输出，用户程序存储器容量一般为 2～8 KB，一般采用模块式结构。其 I/O 的处理方式除了采用一般 PLC 通用的扫描处理方式外，还能在用户程序的执行过程中，直接读输入、刷新输出。它可以插入各种特殊功能模块，它的控制功能和通信联网功能强、指令系统更丰富、扫描速度更快、内存容量更大。

(4) 大型 PLC。大型 PLC 的输入、输出点数和在 512～8192 之间，用户程序存储器容量达 8～64 KB，采用模块式结构。它具有更完善的控制功能、自诊断功能和通信联网功能，它有各种通信联网模块，可以构成三级通信网，以实现工厂生产和管理的自动化。

(5) 超大型 PLC。超大型 PLC 的输入、输出点数和在 8192 以上，用户程序存储器容量大于 64 KB，采用模块式结构。目前也有 I/O 点数达 14336 点的超大型 PLC，使用 32 位微处理器、多 CPU 并行工作以及大容量存储器，功能强

大。

2. 按结构形式分类

按 PLC 的结构形式分类，通常可分为整体式、模块式和叠装式三种。

（1）整体式

整体式结构是将电源、CPU、存储器和 I/O 接口等所有电路都安装在同一机体内。整体式具有结构紧凑、体积小、重量轻、价格低以及容易装入工业设备内部等优点。同一系列不同型号的整体式 I/O 点数是固定的，一般微型及小型 PLC 常采用这种结构。

整体式 PLC 分为不可扩展和可扩展两类。前者的点数不能扩展、不能加装特殊功能模块（如模拟量输入输出模块、网络及通讯模块），适合于较简单的单台机械控制；后者则达到了输入/输出点数灵活配置及易于扩展的目的，该类系列产品通常由不同点数的基本单元（主机）和扩展单元构成，扩展单元有输入/输出型、全输入型、全输出型及特殊功能型等。扩展单元的品种越丰富，其配置就越灵活。

（2）模块式

模块式 PLC 采用搭积木的方式组成系统，在一块有多个插槽的底板上插入电源模块、CPU 模块、输入/输出模块及特殊功能模块，构成一个总 I/O 点数很多的大规模综合控制系统。这种结构的特点是硬件上具有很高的配置灵活性、装配方便、便于扩展。用户可根据需要，选配不同模块组成一个系统，以构成不同控制规模和功能的 PLC。一般中型、大型及超大型 PLC 常采用这种结构。这种结构较复杂、造价较高。

（3）叠装式

以上两种结构各有特色。前者结构紧凑、体积小巧、安装方便，故易于安装在设备的电控箱内，但由于其点数有搭配关系，加之各单元尺寸大小可能不一致，因此不易安装整齐；后者点数配置灵活，又易于构成多点数的大系统，但尺寸较大，较难安装于小型设备之内。

叠装式的结构也是各种单元、CPU 自成独立的模块，但安装不用基板，仅用电缆进行单元间的连接，且各单元可以一层层地叠装，这样，既达到了配置灵活的目的，又可以做到体积小巧。

3. 按实现的功能分类

按照 PLC 所能实现功能的不同，大致可分为低档机、中档机和高档机三种。

（1）低档机。低档机具有逻辑运算、定时、计数、移位、自诊断以及监控等基

本功能，它以逻辑运算、顺序控制为主。

(2) 中档机。中档机除具有低档机的功能外，还具有较强的模拟量输入/输出、算术运算、数据传送、比较、通信、子程序、远程 I/O、中断处理等功能。它可用于既有开关量又有模拟量控制的任务以及复杂的逻辑运算和闭环控制的场合。

(3) 高档机。高档机具有更强的数字处理能力，除具有中档机的功能外，增设有符号算术运算、位逻辑运算、矩阵运算、平方根运算等函数，具有联网通信、LCD 显示器接口、记录以及打印等功能。高档 PLC 能进行智能控制和远程控制，可用于大规模过程控制系统，可与其他计算机构成分布式生产过程综合控制管理系统，以构成整个工厂的自动化网络。

7.1.3 可编程控制器的应用

PLC 在国内外已广泛应用于钢铁、采矿、水泥、石油、化工、电力、机械制造、汽车、装卸、造纸、纺织、环保、娱乐等各行各业，PLC 的应用通常可分为五种类型。

1. 顺序控制

这是 PLC 应用最广泛的领域，用 PLC 可以取代传统的继电器顺序控制系统。它应用于单机控制、多机群控、生产自动线控制等。例如：注塑机、印刷机械、订书机械、切纸机械、组合机械、磨床、装配生产线、包装生产线、电镀流水线及电梯控制等。

2. 运动控制

PLC 制造商目前已提供了拖动步进电动机或伺服电动机的单轴或多轴位置控制模块。在大多数情况下，PLC 把描述目标位置的数据送给位置控制模块，然后模块移动一轴或数轴到目标位置，当每个轴移动时，位置控制模块提供适当的速度和加速度，以确保运动平滑。

3. 过程控制

PLC 能控制大量的物理参数，例如温度、压力、速度和流量等。由于有 PID 模块可供选择，PLC 可以进行闭环控制，因而它可用于过程控制。

4. 数据处理

在机械加工中，出现了把支持顺序控制的 PLC 和计算机数控(CNC)设备紧密结合的趋势，著名的日本 FANUC 公司推出的 System 10、11、12 系列，已将 CNC 控制功能作为 PLC 的一部分。

5. 通信

为了适应工厂自动化系统的发展需要，各个 PLC 之间、PLC 与上级计算机之间需要进行通信，并且作为实时控制系统，PLC 数据通信的速率要求高，而且要考虑停电或故障时的对策等。目前西门子、罗克韦尔等公司的高档 PLC 具有多层网络通信功能，I/O 模块按功能分散放置在各自的生产现场，然后采用网络联接，构成集中管理、分散控制的分布式控制系统。

7.1.4 可编程控制器的发展

目前 PLC 主要朝着两个方向发展。

一是朝着小型化、简易、廉价化方向发展。单片机技术的发展，促进了 PLC 向紧凑型发展，使 PLC 的体积减小、价格降低、可靠性不断提高。这种小型 PLC 可以广泛取代继电器控制系统，应用于单机控制和小型生产线的控制等。

二是朝着大型化、标准化、系列化、智能化、高速化、大容量化、网络化方向发展，这将使 PLC 功能更强、可靠性更高、使用更方便、适用面更广。大型 PLC 一般为多微处理器系统，有较大的存储能力和功能更强劲的输入/输出接口。通过丰富的智能外设接口，可以实现流量、温度、压力以及位置等闭环控制；通过网络接口，可连接不同类型的 PLC 和计算机，从而组成控制范围很大的局域网络，以适用于大型的自动化控制系统。

7.1.5 三菱 FX 系列 PLC

日本三菱公司自 1981 年推出 F 系列小型整体式 PLC 以来，其产品不断升级换代，目前产品为 FX 系列。FX 系列的 PLC 具有体积小、重量轻、抗干扰能力和负载能力很强、性价比优良等特点，在我国应用广泛。

1. FX 系列 PLC

FX 系列 PLC 主要有 FX_{1S}、FX_{1N}、FX_{1NC}、FX_{2N}、FX_{2NC}、FX_{3U}、FX_{3UC}、FX_{3G} 等系列型号的基本单元（主机）及其他扩展单元。这些基本单元在输入/输出点数和功能等方面有所不同，但它们的结构和工作原理是相同的；FX_{1N} 与 FX_{1NC}、FX_{2N} 与 FX_{2NC}、FX_{3U} 与 FX_{3UC} 的区别是前者的输入/输出为接线端子，而后者则使用连接器。扩展单元有输入/输出混合扩展单元、输入专用扩展模块、输出专用扩展模块、模拟量测控扩展单元、电动机控制扩展单元等，以用于扩充基本单元的输入/输出点数或控制功能。

FX_{1S} 的点数较少、有通信等扩展功能，它具有低成本、节省安装空间的特点；FX_{1N} 系列是功能较为强大的普及型 PLC，具有输入/输出、模拟量控制、通



讯、链接功能等扩展性，它广泛应用于一般的顺序控制；FX_{2N}是 FX 家族中较为先进的系列，具有高速处理、可扩展大量特殊功能模块等特点，能为工厂自动化应用提供最大的灵活性和控制能力；FX_{3U}及 FX_{3G}系列为新近推出的新型第三代 PLC，其运算速度、内存容量、性能及功能等都进行了大幅提升，如晶体管输出型的基本单元内置了 3 轴独立、最高 100 kHz 的定位功能，从而使得定位控制功能更加强大，使用更为方便。

2. FX 系列 PLC 型号名称的组成

为了满足用户不同的控制要求，FX 系列 PLC 有多种型号规格。以下描述其基本型号名称的组成，至于扩展单元的型号命名方法，在此不再赘述，读者可查阅 FX 系列的 PLC 手册。

基本单元的型号名称组成如图 7-1 所示，各系列的型号中，只有③所表达的内容或方式略有不同。

FX_{1N} － ○○ M □ － □

系列名　①输入输出总点数　②输出方式　③电源及输入类型

M表示基本单元

图 7-1　基本单元型号名称

① 输入/输出总点数。FX_{1S}为 10～30 点，基本单元为 10/14/20/30 点；FX_{1N}为 14～128 点，基本单元为 14/24/40/60 点；FX_{2N}为 16～256 点，基本单元为 16/32/48/64/80/128 点；FX_{3U}为 16～384 点，基本单元为 16/32/48/64/80/128 点；FX_{3G}为 14～256 点，基本单元为 14/24/40/64 点。

② 输出方式。R——继电器输出，为有触点型、交直流负载两用；T——晶体管输出，为无触点型、直流负载用；S——双向可控硅输出，为无触点型、交流负载用。FX_{1S}和 FX_{1N}系列基本单元没有可控硅输出方式的型号，FX 系列的扩展单元有 R、T 及 S 三种输出方式可供选用。

③ 电源及输入类型。对于 FX_{1S}和 FX_{1N}系列，001-AC 电源 DC 输入型，PLC 的电源电压为 AC 100～240 V，DC +24 V 输入；D-DC 电源 DC 输入型，电源电压为 DC 12～24 V，DC +24 V 输入。对于 FX_{2N}，无符号-AC 电源 DC 输入型，电源电压为 AC 100～240 V，DC +24 V 输入；D-DC 电源 DC 输入型，电源电压为 DC 24 V，DC +24 V 输入；UA1/UL-AC 电源 AC 输入型，电源电压为 AC 100～240 V，AC 100～120 V 输入。

7.2 可编程控制器的结构和工作原理

PLC 的种类和规格很多，尽管不同厂家生产的 PLC 的结构及功能不尽相同，但它们的基本结构与工作原理大体相同。PLC 的主体通常由微处理器、存储器、电源、输入/输出部件以及通信接口等构成，其中整体式的组成结构如图7-2虚线框内所示。

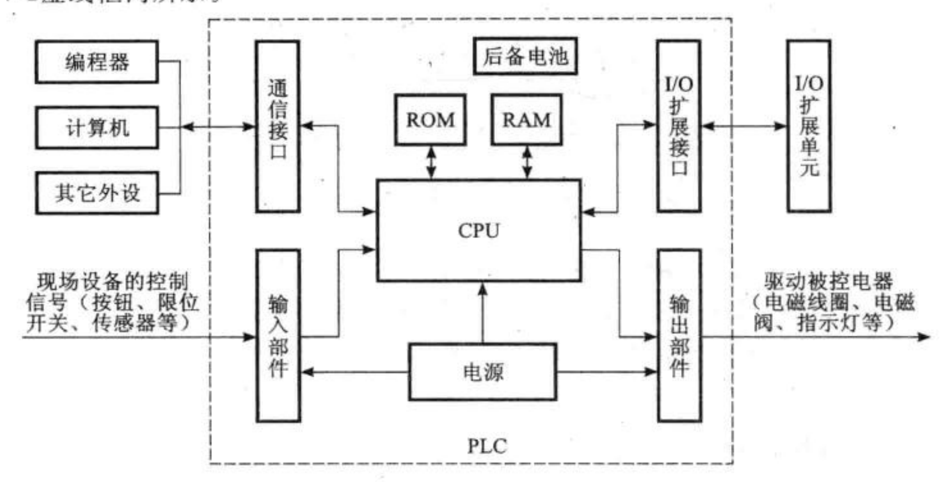


图 7-2 整体式 PLC 结构框图

以 FX_{1N}-40MR-001 基本单元为例，输入/输出为接线端子的整体式 PLC 主机面板，其输入/输出端子编号如图 7-3 所示，上面一排为交流电源、输入接线端子，下面一排为 PLC 向外部传感器提供的 DC 24 V、输出接线端子。FX_{1N}-40MR-001 基本单元的输入有 24 点，输出有 16 点，共 40 点。本书描述 PLC 的输入、输出结构及端口分配时，是以 FX_{1N}系列为例，其它 FX 系列的 PLC 基本相同。

7.2.1 PLC 的工作电源

根据供电种类的不同，FX 系列 PLC 有两种规格供选用。一种是外接单相交流电源，额定电压为 AC 100～240 V，电压允许范围为 AC 85～264 V，电源

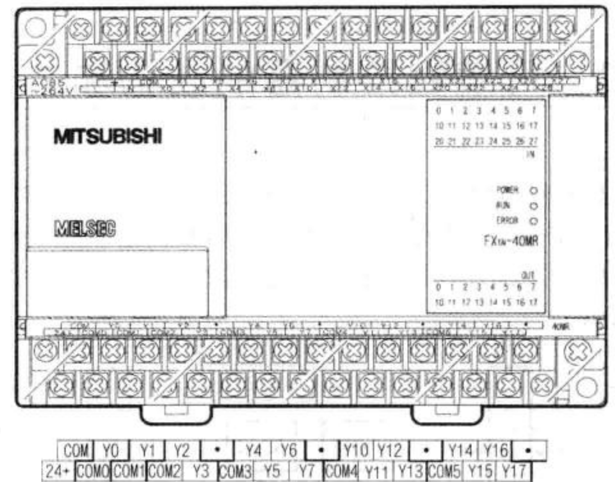


图 7-3 FX_{1N}-40MR-001 基本单元

频率为 50/60 Hz;另一种是外接直流电压源,额定电压为 DC 24 V,电压允许范围一般为 DC +16.8～28.8 V,需要注意的是,PLC 输出接线端子排上的 DC 24 V 是 PLC 向外提供的电源,其功率较小,主要用于给外部传感器提供电源。

7.2.2 输入结构

FX 系列 PLC 的基本单元和扩展单元的输入有两种结构可供选用:DC 输入型和 AC 输入型。DC 输入型(或 AC 输入型)每个输入端的内部电路都相同,输入端也称为输入继电器,例如,FX_{1N}-40MR 基本单元的 24 个输入端 X000～X027(八进制)也称为输入继电器 X000～X027(可视为继电器线圈)。

1. DC 输入型

DC 输入型的输入电路和内部结构如图 7-4 所示,由于输入端的电源是 PLC 内部提供的 DC 24 V,流过输入端的电流是直流,故称之为 DC 输入型。

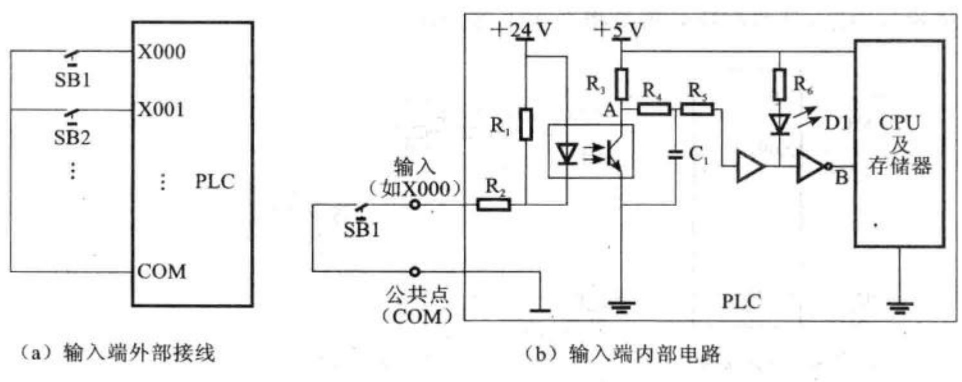
1) 输入结构

PLC 内部输入电路主要包括光电隔离器和输入控制电路。光电隔离器有效地隔离了外输入电路与 PLC 内部电路之间电的联系,具有较强的抗干扰能力。各种有触点和无触点的开关输入信号经光电隔离器转换成控制器(由 CPU 等组成)能够接受的电平信号,并将开关状态输入到输入映像区(输入状态寄存

器)中。

由继电器控制系统可知,开关元件受激为 1,如按钮受压为 1,继电器线圈通电为 1;触点断开状态为 0,触点闭合状态为 1。如图 7-4(b)所示,按 SB1,SB1 常开触点闭合为 1,光电隔离器(集成电路)的发光二极管发光,光敏三极管受光照而饱和导通,A 点电平为 0(低电平),B 点电平为 1(高电平),因此,输入电路把开关信号的 1 转换为电信号的 1,且经 CPU 存入输入映像区中 X000 的对应位;反之,松开 SB1,SB1 常开触点断开为 0,B 点电平为 0,同理输入映像区中 X000 的对应位也变为 0。同时,由于按 SB1,SB1 常开触点闭合为 1,则继电器 X000 的输入为 1,故输入继电器 X000 受激,其触点动作;松开 SB1,SB1 常开触点断开为 0,则继电器 X000 的输入为 0,故输入继电器 X000 复位,其触点也复位。D1 为 PLC 输入指示灯,按钮 SB1 闭合灯亮,反之灯熄,输入指示灯的亮暗情况可以直接在 PLC 的面板进行观察。

图 7-4(b)中的 R_4、R_5 及 C_1 组成输入滤波器,以防止输入接点抖动和输入线混入噪声而引起误操作,该滤波器使输入开关信号边沿的响应时间滞后约 10 ms;对于 FX 系列基本单元的输入端,PLC 还内置相应的数字滤波器,这些滤波器可以根据特殊数据寄存器 D(如 X000～X007 为 D8020,X010～X017 为 D8021)的不同,使滤波时间在 0～15 ms 内变更,以满足不同输入的滤波时间要求。



(a) 输入端外部接线　　(b) 输入端内部电路

图 7-4　DC 输入型输入电路

2) 输入接线

PLC 对于输入元件的要求特别简单,例如某一按钮具有一常开、一常闭触头,对于 PLC 只需接入一常开(或一常闭)触头,控制器根据该触头的状态即可判断按钮是否动作,而且这一触头的状态可在程序中重复使用,完全用不着多触头和多层次的开关,这既大大减少了输入信号接线的数量,同时也简化了电器元件的结构。

所有 PLC 的开关量输入线都是经过光电隔离引入的。用户只需将用于控制的开关接在输入端与公共点(COM)之间便可输入信号，如图 7-4(a)所示。除有实际触点的开关元件之外，以电平信号输出的开关量传感器(如光电、磁感应器等)也可作为输入元件，接通时流经输入回路的电流不小于 4.5 mA；而断开时，不多于 1.5 mA 即可；并且要求传感器为 NPN 集电器开路型输出。若该传感器输出的接通电流小于 4.5 mA，则需在传感器与 PLC 输入之间加上放大器，或更换一个大输出电流的传感器；如关闭电流大于 1.5 mA，可加一个串联电阻至 PLC 输入端以降低输入电流。PLC 输出端侧提供的＋24 V 直流电源可作传感器电源之用。

2. AC 输入型

AC 输入型的输入电路和内部结构如图 7-5 所示，由于输入端的电源是外接的交流电源，流过输入端的电流是交流，故称之为 AC 输入型。

输入端外接的电源通常为 AC 100～120 V、50/60 Hz，输入端开关闭合时流过的电流约为 4.7 mA/AC 100 V 50 Hz、6.2 mA/AC 100 V 60 Hz。与 DC 输入型一样，AC 输入型的输入端内部也有光电隔离器。

与 DC 输入型相比，AC 输入型的输入响应时间更长，约 25～30 ms，因此，对于 AC 输入型，不能通过 X000～X007 执行高速读取，即不适用于高速计数器或输入中断，某些高速处理等指令也不能使用。

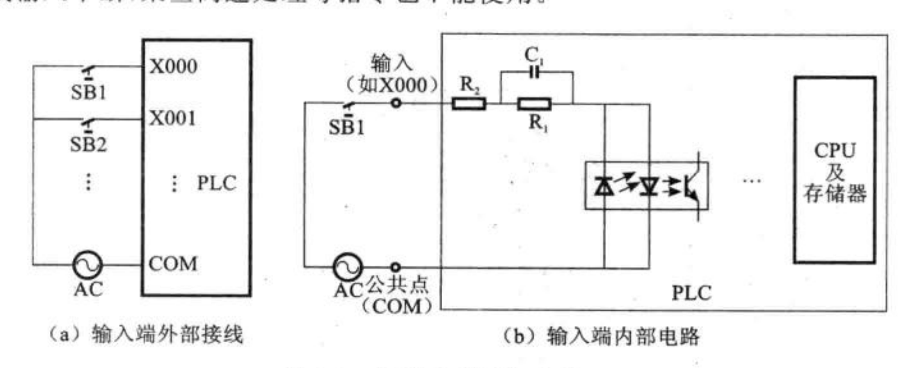


图 7-5　AC 输入型输入电路

7.2.3 输出结构

PLC 的输出端 Y000～Y007(八进制)等也称为输出继电器，输出继电器有无数个常开/常闭触点，在程序中可任意使用。输出端内部使用的功率元件有继电器、晶体管和双向可控硅三种。

1. 继电器输出电路

FX_{1N}-40MR、FX_{2N}-48MR 等基本单元，FX_{2N}-16EYR 等扩展模块为继电器输出，可控制交直流负载。内部输出部分主要包括输出控制电路、微型功率继电器。PLC 内部的输出结构如图 7-6 所示。每个微型继电器对外提供一对常开触头，可直接用来通断各种接触器、电磁阀和小型马达等。继电器有电气隔离作用，可避免外部负载的高电压对 PLC 内部的干扰和破坏。

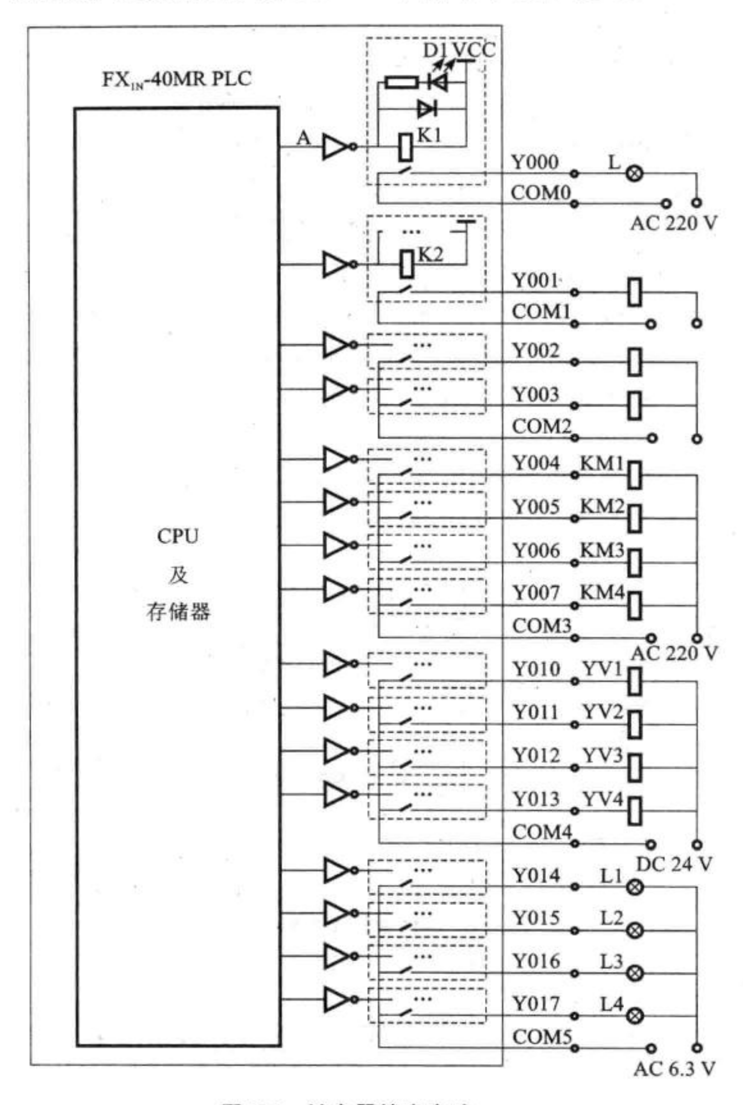


图 7-6 继电器输出电路



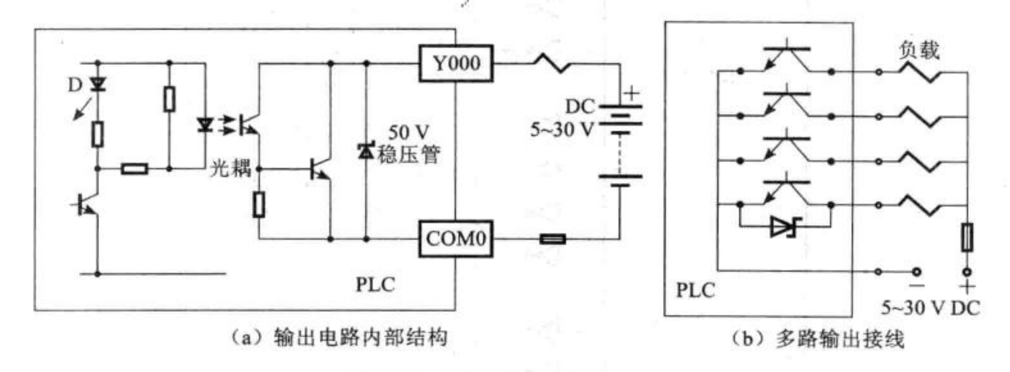
如图 7-6 所示，当输出继电器 Y000 为 1 时，A 点电平为 1，则 K1 继电器线圈有电，其常开触点闭合，外部负载 L 有电；反之 Y000 为 0，A 点电平为 0，则 K1 继电器线圈断电，其常开触点断开，外部负载 L 断电。其他输出继电器的动作过程与 Y000 相同。

输出接线示例如图 7-6 所示，图中的 PLC 为 FX_{1N}-40MR 基本单元。继电器输出外部电源为 DC +30 V 或 AC 250 V 以下，电阻负载为 2 A/1 点、8 A/4 点 COM，电感性负载为 80 VA，最小负载为 DC 5 V、2 mA。输出响应时间约 10 ms（输出从断开到闭合或从闭合到断开）。有 3 组为每 4 点共用一公共端；有 1 组为每 2 点共用一公共端；有 2 组分别带独立公共端。

2. 晶体管输出电路

FX_{1N}-40MT 等基本单元、FX_{2N}-16EYT 等输出扩展模块为晶体管输出，该晶体管工作于开关状态，用于控制直流负载的通/断电。这些输出也为开关信号，因此我们也将这些输出称为输出继电器。晶体管输出型基本单元和扩展单元的输出结构及接线示例如图 7-7 所示，PLC 的内部控制电路与输出晶体管之间有光电隔离器，能可靠隔离外部负载等对内部控制电路的干扰，每个输出晶体管并联了一个稳压管，用于浪涌电压的吸收，以防止晶体管因浪涌电压过高而击穿。

晶体管输出的外部电源为 DC 5～30 V，电阻负载为 0.5 A/1 点、0.8 A/4 点 COM，电感性负载为 12 W/DC 24 V，输出响应时间小于 0.2 ms。



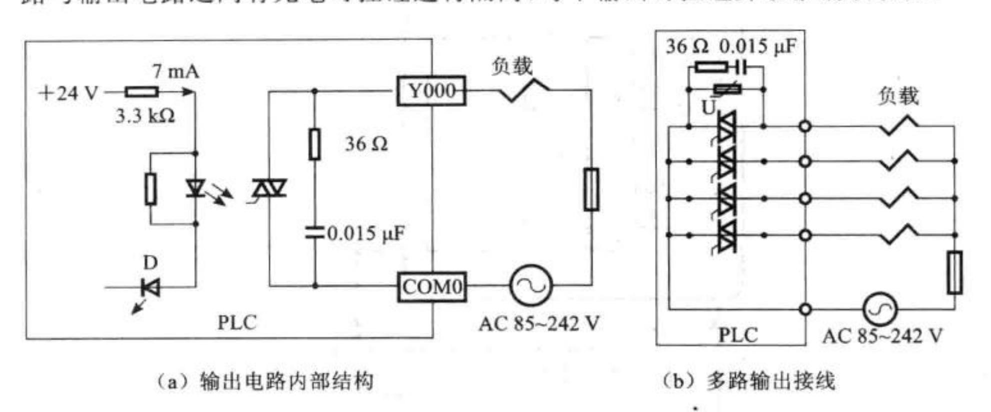
（a）输出电路内部结构　（b）多路输出接线

图 7-7　晶体管输出电路

3. 双向可控硅输出电路

FX_{2N}-64MS 等基本单元、FX_{2N}-14EYS 等输出扩展模块为双向可控硅输出，该可控硅工作于开关状态，用于控制交流负载的通/断电，可控硅输出型基本单元和扩展单元的输出结构及接线示例如图 7-8 所示。PLC 的内部控制电

路与输出电路之间有光电可控硅进行隔离，每个输出可控硅并联浪涌吸收器。



（a）输出电路内部结构　　（b）多路输出接线

图 7-8 双向可控硅输出电路

可控硅输出的外部电源为 AC 85～242 V，电阻负载为 0.3 A/1 点、0.8 A/4 点 COM，电感性负载为 15 VA/AC 100 V、30 VA/AC 200 V。输出响应时间为从断开到闭合小于 1 ms，从闭合到断开小于 10 ms。

7.2.4 PLC 的工作方式

如图 7-9 所示，PLC 是通过一种周期工作方式来完成控制的，每个工作周期分为输入采样、程序执行和输出刷新三个阶段。

1. 输入采样阶段

当 PLC 开始周期工作时，CPU 首先以扫描方式按顺序采样所有输入端的开关信号状态（输入端开关闭合状态为“1”，断开状态为“0”），并逐一存入输入映像区（寄存器）。输入映像区的位数与输入端子数目相对应，输入采样结束后转入程序执行阶段。

2. 程序执行阶段

组成程序的每条指令是按顺序依次存入存储器中的，这个顺序号称为步序，在程序执行时，从 0 步开始顺序执行程序指令。执行指令时，若涉及输入或输出状态，就从输入映像区或输出映像区的某对应位读取，然后进行逻辑运算，运行结果存入各元件在映像区的对应位中，在全部程序未执行完毕之前，这个结果不会送到输出端口上。

3. 输出刷新阶段

在所有指令执行完毕后，将输出映像区中所有输出继电器的 0/1 状态传送至输出锁存区，驱动微型功率继电器（或晶体管、双向可控硅），以形成 PLC 的

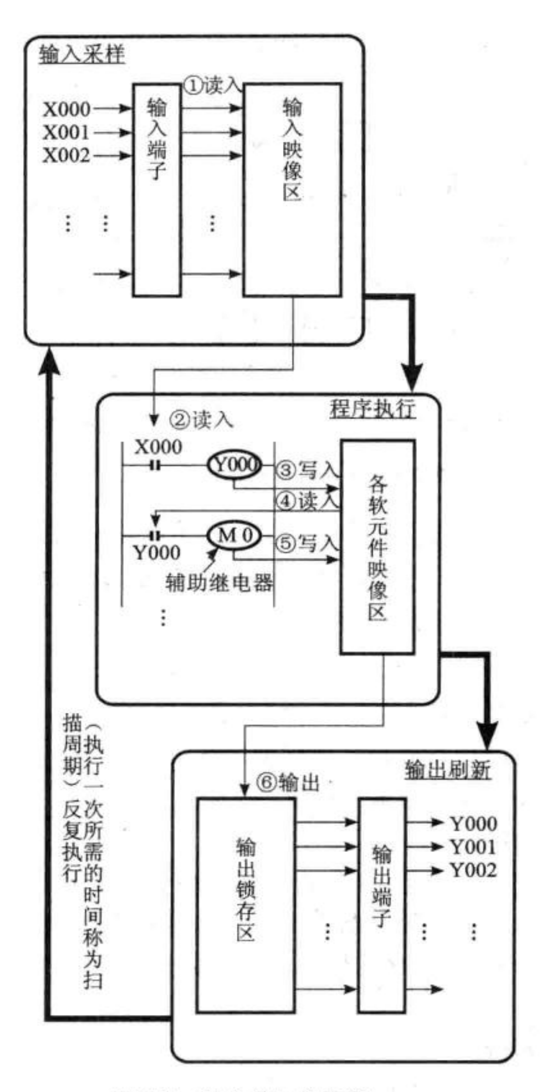


图 7-9　PLC 的工作周期

实际输出。

PLC 经过这三个阶段的工作过程，称为一个扫描工作周期，之后，步序恢复为 0，PLC 又重新执行上述过程，周而复始地进行。

从 PLC 的工作过程可知，当 PLC 工作进入程序执行阶段时，即使输入状态发生变化，输入映像区的内容也不会变化，这些变化只有在下一工作周期的输入采样阶段才被读入。当输入的 ON/OFF(输入开关的闭合/断开)的时间宽度

小于输入滤波时间与扫描工作周期时间之和时，会造成输入不被响应的问题，即 PLC 不接受宽度窄的输入脉冲信号。如考虑输入滤波器的响应滞后时间为 10 ms，设工作周期为 10 ms，则 ON/OFF 的时间要大于 20 ms，否则不能处理 1/(20 ms+20 ms)=25 Hz 以上的输入脉冲。但可通过 PLC 的一些特殊功能，如高速计数器功能、输入中断功能、脉冲捕捉功能以及输入滤波器滤波时间调整等功能，来改善这种情况。

同理，存于输出映像区中的输出继电器信号，要待输出刷新阶段才能输出到输出部件。因此，输入、输出的改变，需要经过一个工作周期，或者说，输入、输出状态的保持为一个工作周期。若要在程序执行阶段获取最新输入信号并立即输出运算结果时，可使用输入、输出刷新指令。

PLC 工作周期的长短，主要取决于程序的长短，一般 PLC 的工作周期为 20～40 ms，这对一般工作设备没有什么影响，例如用接触器控制一台电动机，从电流流入接触器线圈，到使触头完成动作需要 30～40 ms 左右，因此，PLC 的周期工作方式在实际应用中，其速度在多数情况下是不成问题的。

从 PLC 的周期工作方式可见，PLC 与继电器控制的工作方式不同。对于继电器控制电路，全部电器动作可以看成是并行执行的，或者说是同时执行的；而 PLC 是以周期方式工作，即串行方式工作，PLC 的电器动作按串行工作方式可避免继电器控制方式中触点“竞争”和“时序失配”的问题。

7.3 可编程控制器使用的元件

PLC 内部有多种类型的元件，随生产厂家的不同，元件类型有所不同，但主要元件基本上是一致的。为了区分类型，采用不同的名称和编号来命名。FX 系列可编程控制器中，输入/输出继电器编号为八进制，其他继电器编号为十进制，FX 系列 PLC 还有特殊功能继电器，不受输入/输出元件的影响，这些继电器主要是用于监视及逻辑控制。

PLC 中所有的继电器元件都是利用软件编程的方法实现的，因此这些元件也称为软元件。

7.3.1 输入继电器(X)

输入继电器用来接收用户输入设备发来的输入开关信号，它的代表符号是



"X"。一个输入端对应一个输入继电器，一个输入继电器实际上就是 PLC 用户程序只能读的一位存储位，它有两种状态：当外接的开关闭合即 ON 状态时，虚拟的线圈被驱动为 1(通电)；当开关断开即 OFF 状态时，被驱动为 0(断电)。

在用户编写的 PLC 程序中，既可以使用输入继电器的常开触点，也可以使用输入继电器的常闭触点。尽管输入端只有一对触点接入，但输入继电器是软件实现的软元件，因此每个输入继电器的常开与常闭触点在程序中可以反复使用，即使用次数不受限制。

在用户编写的程序中，绝对不可以出现输入继电器的线圈，只能出现输入继电器的触点。输入继电器的虚拟线圈只能由输入开关驱动，其线圈状态仅取决于外部输入开关信号的状态，不受用户程序的控制。

基本单元的输入继电器编号是固定不变的，扩展单元和扩展模块的输入继电器编号是从基本单元输入继电器最靠近的顺序开始编号。

FX 系列 PLC 的输入继电器以八进制进行编号，编号范围为 X000～X007、X010～X017、X020～X027、X030～X037 等。部分 FX 系列 PLC 的输入继电器编号如表 7-1 所示。

7.3.2 输出继电器(Y)

输出继电器用来控制外部负载的通断电，其代表符号为"Y"。一个输出端对应一个输出继电器，一个输出继电器实际上就是 PLC 程序可读/写的一位存储位，该存储位相当于输出继电器的线圈。输出继电器线圈由程序内的各种软元件触点进行驱动。

输出继电器的线圈由 PLC 程序来驱动，在输出刷新阶段，线圈的状态传送给输出单元，再由输出单元对应的常开触点开关(微型继电器、晶体管、双向可控硅)驱动外部负载。

尽管输出端的内部只有一对输出常开触点(或电子常开触点)，但输出继电器也是软件实现的软元件，因此其常开触点及常闭触点有无数个，在程序中可任意多次使用。

输出继电器与输入继电器一样，基本单元的输出继电器编号也是固定的，扩展单元和扩展模块的输出继电器编号也是按与基本单元输出继电器编号最靠近的顺序开始编号。

FX 系列 PLC 的输出继电器也是以八进制进行编号，编号范围为 Y000～Y007、Y010～Y017、Y020～Y027、Y030～Y037 等。部分 FX 系列 PLC 的输出继电器编号如表 7-1 所示。

表 7-1 部分 FX 系列 PLC 的输入/输出继电器编号

系列	型 号	总点数	继电器类型	点数	继电器编号
FX_{1S}	FX_{1S}-10M□	10	输入继电器	6	X000～X005
			输出继电器	4	Y000～Y003
	FX_{1S}-14M□	14	输入继电器	8	X000～X007
			输出继电器	6	Y000～Y005
	FX_{1S}-20M□	20	输入继电器	12	X000～X007,X010～X013
			输出继电器	8	Y000～Y007
	FX_{1S}-30M□	30	输入继电器	16	X000～X007,X010～X017
			输出继电器	14	Y000～Y007,Y010～Y015
FX_{1N} (FX_{1NC})	FX_{1N}-14M□	14(16)	输入继电器	8	X000～X007
			输出继电器	6(8)	Y000～Y007(Y006、Y007 是空号)
	FX_{1N}-24M□	24(32)	输入继电器	14(16)	X000～X007,X010～X017(X016、X017 是空号)
			输出继电器	10(16)	Y000～Y007,Y010～Y017
	FX_{1N}-40M□	40	输入继电器	24	X000～X007,X010～X017,X020～X027
			输出继电器	16	Y000～Y007,Y010～Y017
	FX_{1N}-60M□	60(64)	输入继电器	36(40)	X000～X007,X010～X017,…,X040～X047
			输出继电器	24	Y000～Y007,Y010～Y017,Y020～Y027
FX_{2N} (FX_{2NC})	FX_{2N}-16M□	16	输入继电器	8	X000～X007
			输出继电器	8	Y000～Y007
	FX_{2N}-32M□	32	输入继电器	16	X000～X007,X010～X017
			输出继电器	16	Y000～Y007,Y010～Y017
	FX_{2N}-48M□	48	输入继电器	24	X000～X007,X010～X017,X020～X027
			输出继电器	24	Y000～Y007,Y010～Y017,Y020～Y027

续表

系列	型　　号	总点数	继电器类型	点数	继电器编号
FX_{2N} (FX_{2NC})	FX_{2N}-64M□	64	输入继电器	32	X000～X007,X010～X017,…,X030～X037
			输出继电器	32	Y000～Y007,Y010～Y017,…,Y030～Y037
	FX_{2N}-80M□	80	输入继电器	40	X000～X007,X010～X017,…,X040～X047
			输出继电器	40	Y000～Y007,Y010～Y017,…,Y040～Y047
	FX_{2N}-128M□	128	输入继电器	64	X000～X007,X010～X017,…,X070～X077
			输出继电器	64	Y000～Y007,Y010～Y017,…,Y070～Y077
FX_{3U} (FX_{3UC})	FX_{3U}-16M□	16	输入继电器	8	X000～X007
			输出继电器	8	Y000～Y007
	FX_{3U}-32M□	32	输入继电器	16	X000～X007,X010～X017
			输出继电器	16	Y000～Y007,Y010～Y017
	FX_{3U}-48M□	48	输入继电器	24	X000～X007,X010～X017,X020～X027
			输出继电器	24	Y000～Y007,Y010～Y017,Y020～Y027
	FX_{3U}-64M□	64	输入继电器	32	X000～X007,X010～X017,…,X030～X037
			输出继电器	32	Y000～Y007,Y010～Y017,…,Y030～Y037
	FX_{3U}-80M□	80	输入继电器	40	X000～X007,X010～X017,…,X040～X047
			输出继电器	40	Y000～Y007,Y010～Y017,…,Y040～Y047

注:()中表示占用点数,占用点数与有效点数之间的差为空编号。

7.3.3 辅助继电器(M)

辅助继电器是 PLC 中数量最多的一种继电器，它的代表符号是“M”，其编号采用十进制，它也由虚拟的线圈、常开触点和常闭触点组成。辅助继电器的线圈与输出继电器一样，也由用户程序内的各种软元件触点进行驱动。

辅助继电器也是用软件实现的，其常开触点及常闭触点也可任意多次使用，它们既不能像输入继电器那样接收外部的输入信号，也不能像输出继电器那样直接驱动外部负载，它们相当于继电器控制系统中的中间继电器。

FX 系列 PLC 的辅助继电器有通用辅助继电器、断电保持辅助继电器和特殊辅助继电器三种。部分 FX 系列 PLC 的辅助继电器编号如表 7-2 所示。

1. 通用辅助继电器

若可编程控制器运行时电源突然中断，输出继电器和这些通用辅助继电器全部变为 0，即相当于线圈断电；当再次来电时，除了因外部输入信号驱动而变为 1 的外，其余的仍将保持 0 状态。

2. 断电保持辅助继电器

某些控制系统要求记忆电源中断时的状态，系统重新来电时使用断电前的状态，断电保持辅助继电器可以用于这种应用。断电保持的要求请参阅表 7-2 的注释。

表 7-2 部分 FX 系列 PLC 辅助继电器编号

系列	辅助继电器							
	通用		保持用				特殊用	
			保持用可变区		保持用固定区			
	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数
FX_{1S}	M0～M383	384	—	—	M384～M511（EEPROM 保持）	128	M8000～M8255	256
FX_{1N}	M0～M383	384	M512～M1535（电容保持 10 日）	1024	M384～M511（EEPROM 保持）	128	M8000～M8255	256
FX_{2N}	M0～M499	500	M500～M1023	524	M1024～M3071	2048	M8000～M8255	256
FX_{3U}	M0～M499	500	M500～M1023	524	M1024～M7679	6656	M8000～M8511	512

注：① FX_{2N} 和 FX_{3U} 系列保持用的可变区和固定区均由电池供电，可通过参数设置，将可变区改变为非保持用，即改变为通用辅助继电器；固定区的保持特性不可改变，即只能用作保持用辅助继电器。

②对于电容保持的元件，PLC 需连续通电 30 min 以上，以使电容充满电，掉电保持时间为 10 d；对于 EEPROM 保持的元件，PLC 需连续通电 5 min 以上。



3. 特殊辅助继电器

特殊辅助继电器是具有某项特定功能的辅助继电器，它们用来表示可编程控制器的某些特定状态，提供时钟脉冲和设定可编程控制器的运行方式，或用于步进顺序控制、禁止中断、设定计数器为加计数或减计数等。

特殊辅助继电器分为触点利用型和线圈驱动型。触点利用型由可编程控制器的系统程序自动驱动其线圈，在用户程序中可直接使用其触点，但在用户程序中不能出现其线圈。触点利用型举例如下。

M8000(RUN监视)：当PLC运行(RUN)即执行用户程序时，M8000一直为1；当停止(STOP)运行时，M8000为0。

M8002(初始脉冲)：在PLC从STOP切换为RUN时(即执行程序时)，M8002输出一个时间为一个扫描工作周期的1的脉冲(即时间为一个扫描周期的ON状态)。

M8011～M8014分别是10 ms、100 ms、1 s、1 min的时钟脉冲。

线圈驱动型由用户程序驱动其线圈，使可编程控制器执行特定的操作。如驱动M8034的线圈为1，则全部输出被禁止；驱动M8032的线圈为1，则作保持用的存储器全部清零。

7.3.4 状态(S)

状态S是对步进式顺序控制进行简易编程所需的重要软元件，此时需要与步进指令STL配合使用，且在使用SFC图的编程方式中也可以使用状态。当状态S不用于步进指令时，可当作普通辅助继电器M使用。

状态有初始用状态、返回原点用状态、一般用状态、保持用状态以及报警用状态五种，前四种状态要与STL指令配合使用。

部分FX系列PLC的状态S编号如表7-3所示。

表7-3 部分FX系列PLC状态编号

系列	状态									
	初始用		返回原点用		一般用		断电保持用		报警用	
	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数
FX_{1S}	S0～S9	10	S10～S19	10	—	—	S0～S127	128	—	—
FX_{1N}	S0～S9	10	—	—	—	—	S0～S999	1000	—	—
FX_{2N}	S0～S9	10	S10～S19	10	S20～S499	480	S500～S899	400	S900～S999	100
FX_{3U}	S0～S9	10	—	—	S10～S499	490	S500～S4095	3496	S900～S999	100

7.3.5 定时器(T)

定时器 T 在 PLC 中的作用，相当于继电器控制系统中的通电延时时间继电器。定时器有一个设定值寄存器(一个字长、最大值为 32767)、一个当前值寄存器(一个字长)和一个用来存储其输出触点状态的映像寄存器，这三个量使用同一地址编号，但使用场合不一样，其意义也不同。定时器可提供无数对常开、常闭触点供编程使用。通常 PLC 中有几十至数百个定时器。

定时器是对已知频率的时钟脉冲进行计数而达到定时的目的，时钟脉冲周期有 1 ms、10 ms及 100 ms 三种，当所计数达到设定值时，即定时时间到时，定时器的触点动作。定时器设定值可用常数 K 指定，也可以用数据寄存器 D 的内容作为设定值。

定时器按特性的不同可分为通用型定时器和累积型定时器。部分 FX 系列 PLC 的定时器编号如表 7-4 所示，其中 T192～T199 为子程序和中断程序专用的定时器。

表 7-4　部分 FX 系列 PLC 定时器编号

系列	通用型定时器						累积型定时器			
	100 ms(0.1～3,276.7 s)		10 ms(0.01～327.67 s)		1 ms(0.001～32.767 s)		100 ms(0.1～3,276.7 s)		1 ms(0.001～32.767 s)	
	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数
FX_{1S}	T0～T62	63	T32～T62	31	—	—	—	—	T63	1
FX_{1N}	T0～T199	200	T200～T245	46	—	—	T250～T255	6	T246～T249	4
FX_{2N}	T0～T199	200	T200～T245	46	—	—	T250～T255	6	T246～T249	4
FX_{3U}	T0～T199	200	T200～T245	46	T256～T511	256	T250～T255	6	T246～T249	4

注：对于 FX_{1S}系列，当 M8028 为 1 时，T32～T62 可变更为 10 ms 的定时器。

7.3.6 计数器(C)

计数器的作用是对指定输入端子上的输入脉冲或其他继电器触点逻辑组合的脉冲进行计数。与定时器一样，计数器也有一个设定值寄存器、一个当前值寄存器和一个用来存储其输出触点状态的映像寄存器，这三个量也使用同一地址编号。当计数达到设定值时，计数器的触点动作。对作为计数的输入脉冲一般有一定的时间宽度要求，计数发生在输入脉冲的上升沿。所有计数器都有常开触点和常闭触点，在程序中的使用次数不受限制。



计数器按特性的不同可分为五种：通用型 16 位加计数器、断电保持型 16 位加计数器、通用型 32 位加/减计数器、断电保持型 32 位加/减计数器和高速计数器。

部分 FX 系列 PLC 的计数器编号如表 7-5 所示。

表 7-5 部分 FX 系列 PLC 计数器编号

系列	16 位加计数器（计数范围：0～32,767）				32 位加/减计数器（计数范围：－2,147,483,648～＋2,147,483,647）				高速计数器(32 位加/减计数器）	
	通用型		断电保持型		通用型		断电保持型			
	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数
FX_{1S}	C0～C15	16	C16～C31	16	—	—	—	—	C235～C255	6
FX_{1N}	C0～C15	16	C16～C199	184	C200～C219	20	C220～C234	15	C235～C255	6
FX_{2N}	C0～C99	100	C100～C199	100	C200～C219	20	C220～C234	15	C235～C255	6
FX_{3U}	C0～C99	100	C100～C199	100	C200～C219	20	C220～C234	15	C235～C255	6

7.3.7 数据寄存器(D)

PLC 在进行输入/输出处理、模拟量检测与控制、位置控制等场合，需要用数据寄存器 D 来存储数据和参数。数据寄存器存储 16 位二进制数，最高位为符号位。可以根据需要将两个相邻数据寄存器合并组成一个 32 位的数据寄存器，32 位数据寄存器的最高位也是符号位；32 位数据寄存器的高 16 位编号大，低 16 位编号小，如指定 32 位时，若指定了低 16 位为 D0，则高 16 位自动为紧接着的大 1 的编号 D1，即 D1D0 为 32 位数据寄存器；低 16 位既可指定奇数号，也可指定偶数号，但考虑到人机界面、显示模块、编程工具的监控功能等，建议低 16 位取偶数的编号。

部分 FX 系列 PLC 的数据寄存器编号如表 7-6 所示。

表 7-6 部分 FX 系列 PLC 数据寄存器编号

系列	数据寄存器							
	通用		断电保持		文件寄存器（断电保持）		特殊用	
	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数
FX_{1S}	D0～D127	128	D128～D255	128	D1000～D2499	1500	D8000～D8255	256
FX_{1N}	D0～D127	128	D128～D7999	7872	D1000～D7999	7000	D8000～D8255	256
FX_{2N}	D0～D199	200	D200～D7999	7800	D1000～D7999	7000	D8000～D8255	256
FX_{3U}	D0～D199	200	D200～D7999	7800	D1000～D7999	7000	D8000～D8511	512

1. 通用数据寄存器

通用数据寄存器无断电保持功能。在PLC由RUN变为STOP时，所有数据清除为0，若将特殊继电器M8033置1，则PLC由RUN变为STOP时，数据可以保持。

2. 断电保持数据寄存器

断电保持数据寄存器有断电保持功能，只要不改写断电保持数据寄存器，无论PLC运行与否、电源接通与否，都不会改变数据寄存器的内容。

其中D1000～D7999中的数据寄存器，可通过参数设置，以500点为单位作为文件寄存器。

3. 特殊数据寄存器

特殊数据寄存器用来监控可编程控制器的运行状态，如电池电压、扫描时间、正在动作的状态和编号等。尤其在系统调试过程中，可通过读取这些寄存器的内容来监控PLC的当前状态。这些寄存器有的可以读写，有的为只读。未加定义的特殊数据寄存器，用户不能使用。

4. 文件寄存器

文件寄存器用于存储用户的数据文件，是存放大量数据的专用数据寄存器。PLC运行时，用户的数据文件只能用编程器写入，不能在程序中用指令写入文件寄存器，但可以在程序中，用BMOV指令将文件寄存器中的内容读到普通的数据寄存器中。

7.3.8 变址寄存器(V、Z)

变址寄存器实际上是一种特殊用途的数据寄存器，其作用相当于单片机中的变址寄存器，用于改变编程元件的元件号。

FX_{1S}、FX_{1N}、FX_{2N}、FX_{3U}系列PLC的变址寄存器为V0～V7和Z0～Z7，共16点。V、Z都是带符号的16位数据寄存器，与其他数据寄存器一样读写。需要32位操作时，可将V、Z串联组合使用(须编号相同)，如组合时，Z2为低16位，则V2为高16位。

例如，当V0=8时，数据寄存器元件号D5V0相当于D13(5+8=13)。

7.3.9 指针(P、I)

FX系列PLC的程序中允许使用两种标号：一种为P标号，用于子程序调用或程序跳转，称为分支指针；另一种为I标号，专用于中断服务程序的入口地址，称为中断指针。部分FX系列PLC的指针编号如表7-7所示。

表 7-7 部分 FX 系列 PLC 指针编号

系列	指针							
	分支指针		中断指针					
	P 指针		输入中断用的 I 指针		定时用的 I 指针		计数器用的 I 指针	
	编号	点数	编号	点数	编号	点数	编号	点数
FX_{1S}	P0～P63	64	I00□～I50□	6	—	—	—	—
FX_{1N}	P0～P127	128	I00□～I50□	6	—	—	—	—
FX_{2N}	P0～P127	128	I00□～I50□	6	I6□□～I8□□	3	I010～I060	6
FX_{3U}	P0～P4095	4096	I00□～I50□	6	I6□□～I8□□	3	I010～I060	6

指针(P/I)包括分支用的指针 P0～P127(共 128 点)和中断用的 I 指针(共 15 点)。

1. 分支指针

分支指针用来指定跳转指令(CJ)的跳步目标标号和子程序调用指令(CALL)调用的子程序入口地址。当程序执行到子程序中的 SRET(子程序返回)指令时,返回去执行主程序。其中 P63 是程序结束指令(END)的专用标号(不需标记)。

2. 中断指针

中断指针用来指定某一中断源的中断子程序入口标号,当中断子程序执行到 IRET(中断返回)指令时返回主程序。中断的编程方法请参考中断指令章节。

中断指针有三种:输入用中断指针、定时用中断指针以及计数器用中断指针。

输入中断指针编号的意义如图 7-10(a)所示,输入中断指针是指从输入端 X000～X005 输入的有效中断请求信号引起的,中断所要执行的中断子程序的入口地址。如中断指针为 I001,则它是某一中断子程序的入口标号,当 X000 输入端的中断请求信号为有效上升沿时,PLC 暂停主程序的执行,转去执行以标号 I001 开始的中断子程序,当在子程序中执行 IRET 时,则返回主程序断点处继续执行主程序。

输入中断用来接收特定输入地址号的输入信号,并立即执行相应的中断服务程序,中断不受可编程控制器扫描周期工作方式(输入采样、程序执行和输出刷新为一个周期)的影响,一旦中断输入信号有效,可编程控制器能迅速响应。

由于输入中断可以处理比扫描周期更短的脉冲信号，因此可在顺控过程中可作为优先处理或短时间脉冲控制时使用。

输入中断的输入信号的 ON 或 OFF 时间须大于 5 μs。X000～X005 输入中断的允许/禁止标志位为特殊辅助继电器 M8050～M8055 中的相应继电器，该继电器线圈为 1 时禁止相应的输入中断。

定时中断指针编号的意义如图 7-10(b)所示。定时中断有 3 点，设定时间为 10～99 ms，每隔设定时间就会中断一次。3 个定时中断的允许/禁止标志位为特殊辅助继电器 M8056～M8058 中的对应继电器，该继电器线圈为 1 时禁止相应的定时中断。

计数器的中断指针用于使用高速计数器优先处理计数结果的控制。根据高速计数器的比较置位指令(DHSCH)的比较结果，执行相应的中断子程序，其中断的允许/禁止标志位为特殊辅助继电器 M8059，此继电器线圈为 1 时禁止计数器中断。计数器中断指针编号为 I010、I020、I030…I060 共 6 点。

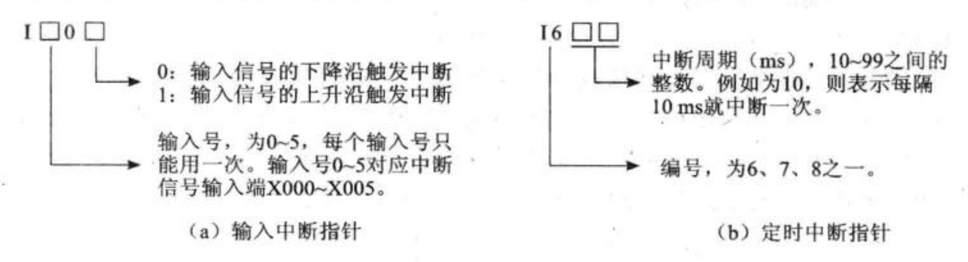


图 7-10 中断指针

7.3.10 常数(K、H)

常数也可以作为元件处理，PLC 最常用的常数有两种：一种是以 K 表示的十进制数，另一种是以 H 表示的十六进制数。如 K100 表示十进制的 100，H100 表示十六进制的 100。它们经常被用作定时器和计数器的设定值、当前值或应用指令的操作数。

16 位、32 位 K 值的取值范围分别为 －32,768～32,767 和 －2,147,483,648～2,147,483,647。16 位、32 位 H 值的取值范围分别为 0～FFFFH 和 0～FFFFFFFFH。

7.4 可编程控制器程序的表达方式

由 PLC 的工作原理可知：PLC 是以程序的形式进行工作的，为此，需要把控制任务变换为程序来表达。PLC 的程序表达方法非常灵活，目前常用的表达方法有五种：梯形图、指令表、顺序功能图、逻辑功能图和高级语言。

7.4.1 梯形图

梯形图是一种图形语言，它与传统的继电器电路非常相似，它仍沿用继电器的触点、线圈、串并联等术语，所不同的是：梯形图中每个元件的名称和编号有 PLC 的特别规定；同一编号继电器的触点（既有常开又有常闭）可以根据需要无限引用；所有触点及其构成的控制回路都是通过软件编程实现其功能的，并无实际连线；梯形图中所有的输出元素（如线圈）都是安排在右侧与母线相连，梯形图中每包含一个被控元素的逻辑段称为一个梯级。梯形图中继电器的线圈、常开触点及常闭触点符号常用图 7-11 中的符号表示。

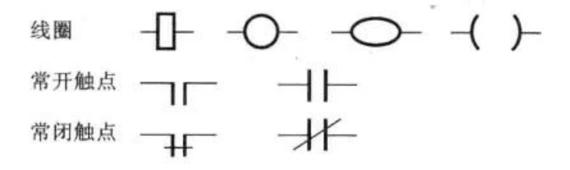


图 7-11 梯形图常用符号

梯形图比较形象、直观，对于熟悉继电器控制表达方式的人来说，很容易接受。在 PLC 中，它是用得最多的一种程序表达方式。

7.4.2 指令表

指令就是用助记符来表达 PLC 的各种功能，它类似于计算机的汇编语言，但又较之简单得多，由指令组成的程序称为指令表（或语句表）程序。这种程序可用编程器输入程序，但指令表程序较难读懂，目前各种 PLC 均有指令的编程功能。

7.4.3 顺序功能图

顺序功能图(SFC——Sequential Functional Chart)是一种按工艺流程顺序进行编程的图形编程语言,在程序中可以直观地看到设备的动作顺序,较易读懂程序,规律性较强,状态(步)、转换条件及驱动负载是顺序功能图的三个主要要素。

7.4.4 逻辑功能图

这种方式基本上是采用半导体逻辑电路的逻辑方块图来表达的。对每一种逻辑功能都使用一个运算方块,其运算功能由方块内的符号确定。常用"与"、"或"、"非"三种逻辑功能表达控制逻辑。有关的输入均画在方块的左边,输出画在方块的右边,信号自左向右流动。对于熟悉数字逻辑电路和具有逻辑代数基础的人来说,用这种方式编程感到较方便。

7.4.5 高级语言

大型 PLC 中,为了进行数据处理、完成 PID 调节等较为复杂的控制,也采用高级语言进行编程。

目前,各类 PLC 都具有两种或两种以上编程语言,其中以梯形图和指令表较为常用。

三菱公司的 FX 系列 PLC 可采用指令表、梯形图和顺序功能图三种程序表达方式,这三种方法编制的程序最终都以指令表的方式存储于 PLC 的程序内存中,并且这三种程序可按图 7-12 所示的方式进行相互转换。

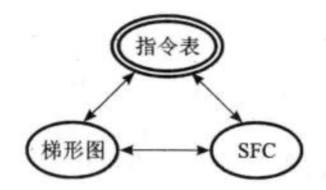
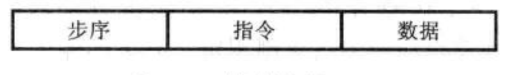


图 7-12 指令表、梯形图和 SFC 的相互转换

不同厂家和类型的 PLC 梯形图、指令系统和使用符号有些差异,但编程的基本原理和方法是相同或相似的。只要掌握了一种 PLC 型号的编程语言和编程方法,就很容易掌握其他类型的 PLC 编程语言和编程方法。

7.5 FX 系列 PLC 的基本指令

FX 系列 PLC 可使用指令表程序，下面介绍它的基本指令系统。每条指令语句由二至三个区域组成，这些区域分别是步序号区、指令区和数据区（目标器件区），格式如图 7-13 所示。大多数语句都包含这三个区域，其中步序号由编程软件或手持编程器自动管理。



步序	指令	数据

图 7-13　指令格式

7.5.1　LD、LDI、OUT 指令

（1）LD（Load）取指令。如果梯形图的左边母线或一个电路块开始的继电器触点为常开触点，则用 LD 指令。LD 指令的目标器件为输入继电器 X、输出继电器 Y、辅助继电器 M、状态 S、定时器 T、计数器 C。执行该指令需 1 个程序步。

（2）LDI（Load Inverse）取反指令。如果左边母线或一个电路块开始的继电器触点为常闭触点，则用 LDI 指令。LDI 指令的目标器件为 X、Y、M、S、T、C。执行该指令需 1 个程序步。

（3）OUT 输出指令。它是线圈驱动指令。OUT 指令的目标器件为 Y、M、S、T、C，对输入继电器 X 不能使用 OUT 指令。执行该指令时，若目标元件为 Y、M，则需 1 个程序步；若目标元件为 S、特殊辅助继电器 M，则需 2 个程序步；若目标元件为 T，则需 3 个程序步；若目标元件为 16 位计数器 C，则需 3 个程序步；若目标元件为 32 位计数器 C，则需 5 个程序步。

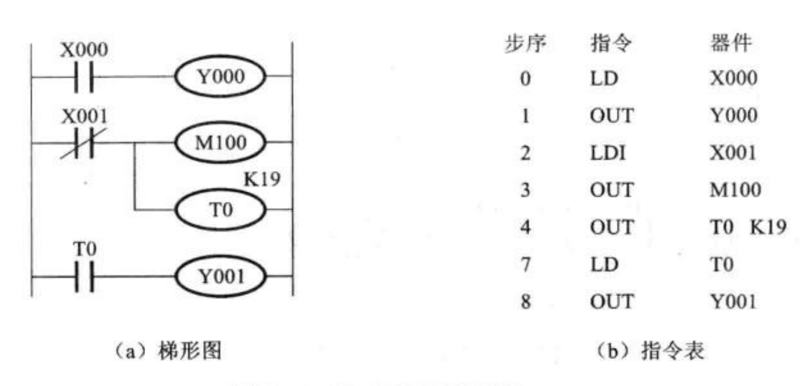
LD、LDI、OUT 指令的使用方法如图 7-14 所示。

由于 OUT 功能是将内存中的内容输出到继电器，故可视为一个梯级的结束。编程者可用 LD 指令开始下一个梯级的编程。

在线圈并联时，OUT 指令可以连续使用若干次。

对定时器和计数器的线圈，使用 OUT 指令后，应设定常数 K。

从图 7-14 指令程序可知，不同指令或指令相同而目标元件不同，执行这些



步序	指令	器件
0	LD	X000
1	OUT	Y000
2	LDI	X001
3	OUT	M100
4	OUT	T0 K19
7	LD	T0
8	OUT	Y001

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-14 LD、LDI、OUT **指令**

指令所需的步数可能不同，但 PC 机的编程软件或手持编程器能自动管理这些程序步。

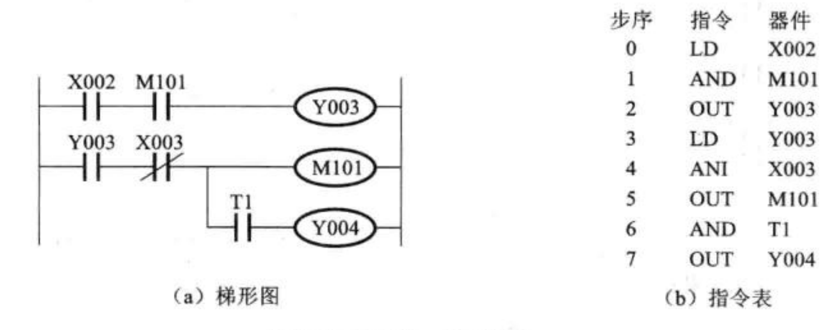
7.5.2 AND、ANI 指令

(1) AND 与指令。用于串联单个常开触点。

(2) ANI(And Inverse)与非指令。用于串联单个常闭触点。

AND、ANI 指令的目标元件为 X、Y、M、S、T、C。执行该指令需 1 个程序步。

AND、ANI 指令的使用如图 7-15 所示。

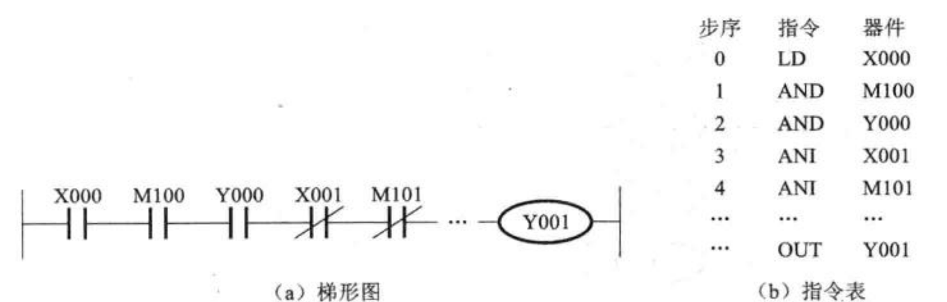


步序	指令	器件
0	LD	X002
1	AND	M101
2	OUT	Y003
3	LD	Y003
4	ANI	X003
5	OUT	M101
6	AND	T1
7	OUT	Y004

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-15 AND、ANI **指令**

如图 7-16，在一个梯级中，串联单个常开触点或单个常闭触点的数目没有限制。在该图中，由于 X000 触点位于梯级之首，必需使用 LD 指令。



步序	指令	器件
0	LD	X000
1	AND	M100
2	AND	Y000
3	ANI	X001
4	ANI	M101
…	…	…
…	OUT	Y001

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-16　串联多个单触点

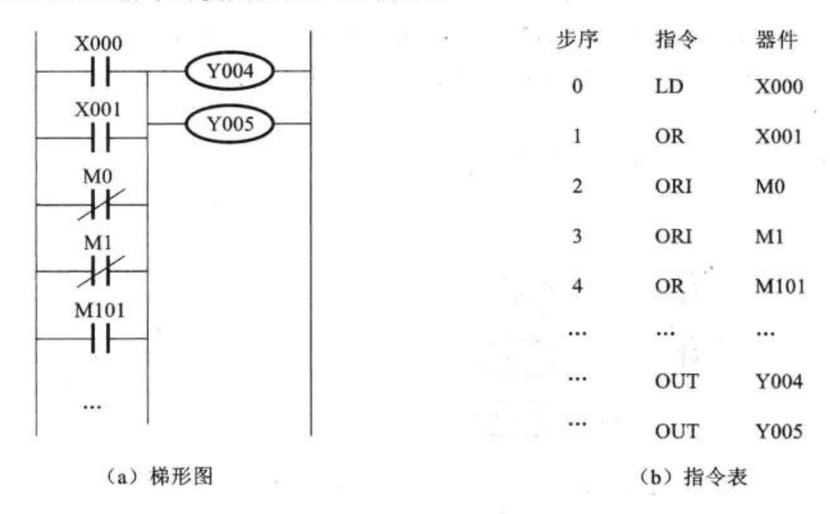
7.5.3 OR、ORI 指令

(1) OR 或指令。用于并联单个常开触点。

(2) ORI(Or Inverse)或非指令。用于并联单个常闭触点。

OR、ORI 指令的目标器件为 X、Y、M、S、T、C。执行该指令需 1 个程序步。

OR、ORI 指令的使用如图 7-17 所示。

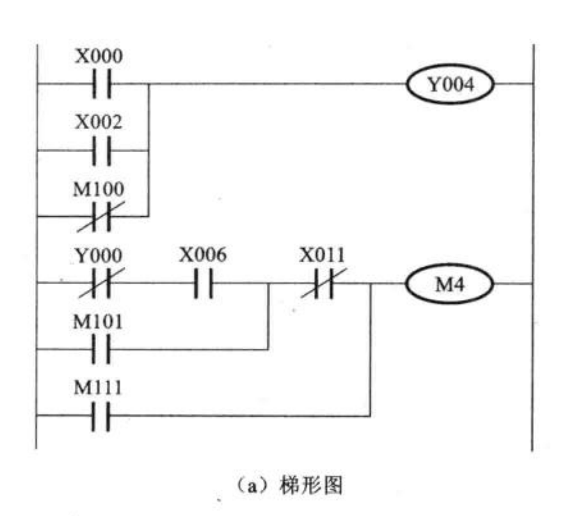


步序	指令	器件
0	LD	X000
1	OR	X001
2	ORI	M0
3	ORI	M1
4	OR	M101
…	…	…
…	OUT	Y004
…	OUT	Y005

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-17　OR、ORI 指令

如图 7-18 所示，在一个梯级中，并联单个常开触点或单个常闭触点的数目没有限制。在该图中，由于 X000 触点位于梯级之首，必需使用 LD 指令。



步序	指令	器件
0	LD	X000
1	OR	X002
2	ORI	M100
3	OUT	Y004
4	LDI	Y000
5	AND	X006
6	OR	M101
7	ANI	X011
8	OR	M111
9	OUT	M4

(a) 梯形图　　(b) 指令表

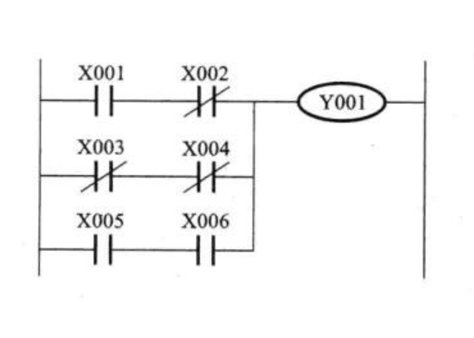
图 7-18　并联多个单触点

7.5.4　ORB、ANB 指令

(1) ORB 指令。ORB(Or Block)是块或指令。它是电路块的并联连接指令，执行该指令需 1 个程序步。

由 2 个以上触点串联连接的电路被称为串联电路块。如果需要把两段串联电路块并联，可利用 ORB 指令来完成。ORB 指令为不带目标器件的独立指令。

ORB 指令的使用如图 7-19 所示。



推荐的程序1			不推荐的程序2		
步序	指令	器件	步序	指令	器件
0	LD	X001	0	LD	X001
1	ANI	X002	1	ANI	X002
2	LDI	X003	2	LDI	X003
3	ANI	X004	3	ANI	X004
4	ORB		4	LD	X005
5	LD	X005	5	AND	X006
6	AND	X006	6	ORB	
7	ORB		7	ORB	
8	OUT	Y001	8	OUT	Y001

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-19　ORB 指令

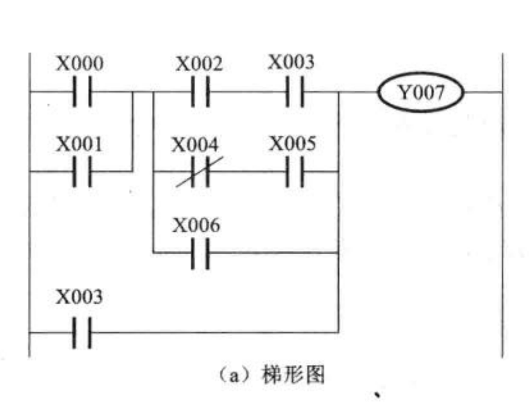
在程序 1 的第 2、5 步，采用 LDI、LD 指令，表示该电路块的开始。即几个电路块并联连接时，对每个电路块的第一个触点使用 LD 或 LDI 指令；在每个电路块的后面使用 ORB 指令，则并联电路块的数量没有限制。

在程序 2 中，先把所有并联的电路块连贯地写完，之后再连续地使用与并联电路块个数相同的 ORB 指令。这种 ORB 指令成批连续地使用是可以的，但是由于在 ORB 指令之前，用于并联连接的电路块中的 LD 和 LDI 指令重复使用次数不能超过 8 次，因此这种编程方法不推荐使用。

(2) ANB 指令。ANB(And Block)是块与指令。它是电路块的串联连接指令，执行该指令需 1 个程序步。

在一个梯级中，如果需要把两段并联电路块串联，可利用 ANB 指令来完成。ANB 指令为不带目标器件的独立指令。

ANB 指令的使用如图 7-20 所示。由于 X000、X002、X004 触点位于电路块的开始，要用 LD 或 LDI 指令。



(a) 梯形图

步序	指令	器件
0	LD	X000
1	OR	X001
2	LD	X002
3	AND	X003
4	LDI	X004
5	AND	X005
6	ORB	
7	OR	X006
8	ANB	
9	OR	X003
10	OUT	Y007

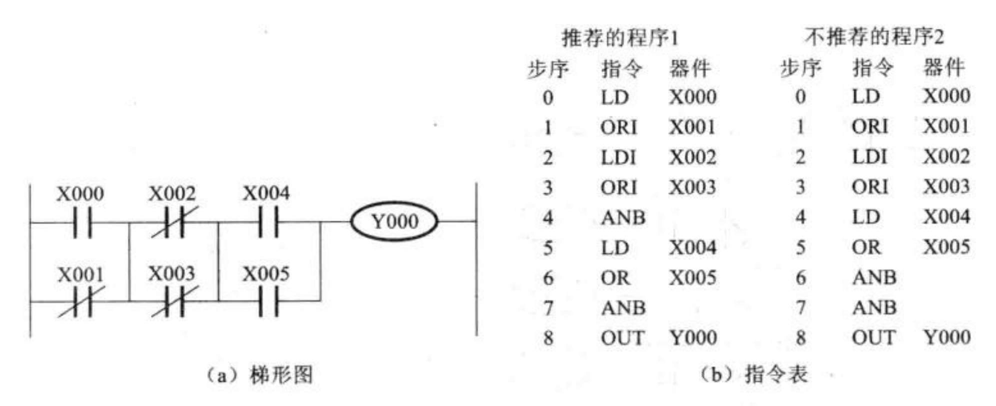
(b) 指令表

图 7-20　ANB 指令

多个电路块连续串联的情况如图 7-21 所示。在程序 1 中，用 ANB 指令按顺序写出各电路块的串联关系，用这种方法写指令程序，对串联电路块的个数没有限制。在程序 2 中，先按顺序写出各个电路块，再连续使用 ANB 指令，但请注意，在 ANB 指令之前，用于串联连接的电路块中的 LD 和 LDI 指令重复使用次数不能超过 8 次。因此，不推荐使用这种方法。

7.5.5 MPS、MRD、MPP 指令

(1) MPS(Push)进栈指令。用于将逻辑状态存入栈存储器。



推荐的程序1

步序	指令	器件
0	LD	X000
1	ORI	X001
2	LDI	X002
3	ORI	X003
4	ANB	
5	LD	X004
6	OR	X005
7	ANB	
8	OUT	Y000

不推荐的程序2

步序	指令	器件
0	LD	X000
1	ORI	X001
2	LDI	X002
3	ORI	X003
4	LD	X004
5	OR	X005
6	ANB	
7	ANB	
8	OUT	Y000

（a）梯形图　　（b）指令表

图 7-21　多个电路块连续串联

(2) MRD(Read)读栈指令。用于读取栈顶数据，但栈的数据不会发生变化。

(3) MPP(Pop)出栈指令。用于将栈顶数据读出，并且栈的数据上移一层。

MPS、MRD、MPP 都是不带目标器件的独立指令。用于带分支多重输出的梯形图。执行这些指令需 1 个程序步。

在 FX 系列 PLC 中，有 11 个被称为栈的记忆逻辑运算中间结果的存储器，每个存储器存储一位二进制数，它遵循“后进先出”的原则，栈的第 1 层为栈顶，栈的第 11 层为栈底，其结构如图 7-22 所示。

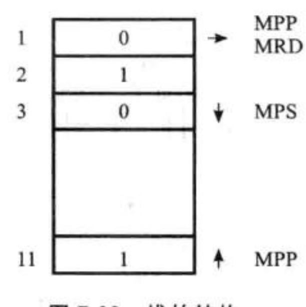
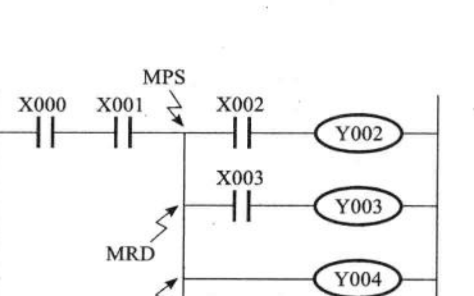


图 7-22　栈的结构

每用一次 MPS 指令，就将栈中的数据从栈顶依次向下移动一层，并将此时指令程序的逻辑运算结果存入栈顶。使用 MPP 指令时，将栈顶的数据读出，然后各层数据按顺序向上移动一层，栈顶原来的数据就从栈中消失。MRD 指令只用来读取栈顶数据，而栈的数据不会发生移动，因此，执行该指令后，该栈顶的数据不会发生变化。

栈指令的使用如图 7-23、图 7-24、图 7-25 所示。

图 7-23 为带多分支多重输出的梯形图，由于 X003、X004 与 X002 的关系，既不是串联，也不是并联，故不能使用 AND、OR 指令。但它们与 X000、X001 相与运算后的结果是串联关系，并且该运算结果直接驱动 Y004 线圈，因此，使用 MPS 指令将该中间运算结果存储在栈存储器中，待需要使用时，再用 MRD、MPP 指令将其从栈存储器中读出。注意，中间分支须使用 MRD 指令，将中间



(a) 梯形图

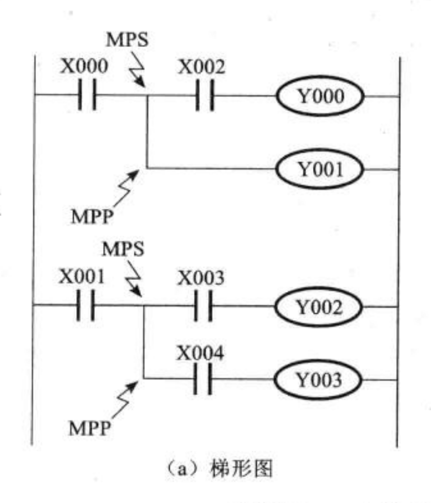
步序	指令	器件
0	LD	X000
1	AND	X001
2	MPS	
3	AND	X002
4	OUT	Y002
5	MRD	
6	AND	X003
7	OUT	Y003
8	MRD	
9	OUT	Y004
10	MPP	
11	AND	X004
12	OUT	Y005

(b) 指令表

图 7-23　多分支多重输出栈指令使用

结果从栈中读出但不清除，以便下一个分支再读出使用；最后分支须使用 MPP 指令，将中间结果从栈中读出并且清除。

图 7-24 为只有一个分支的梯形图，只能使用 MPP 指令，不能使用 MRD 指令。



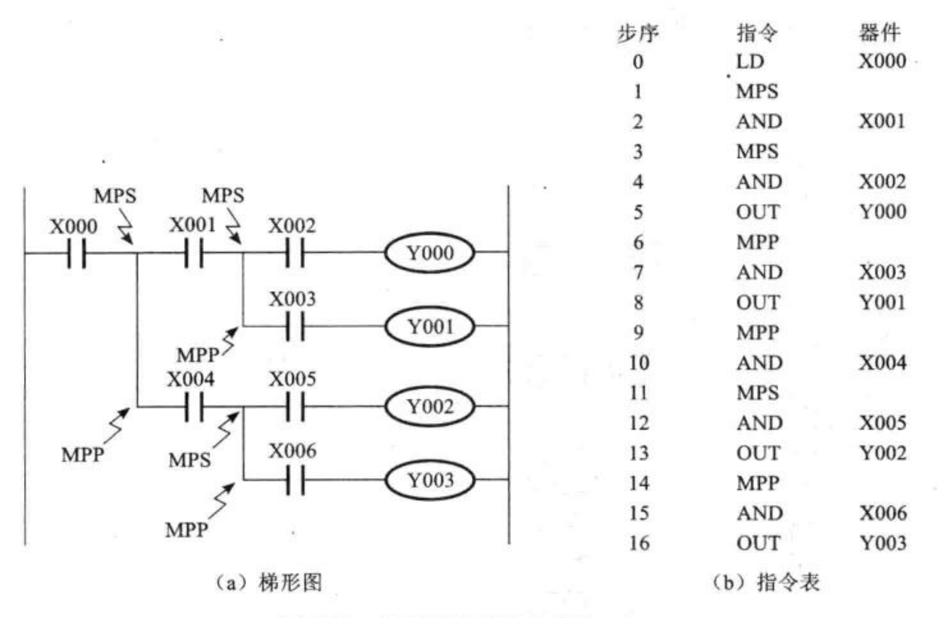
(a) 梯形图

步序	指令	器件
0	LD	X000
1	MPS	
2	AND	X002
3	OUT	Y000
4	MPP	
5	OUT	Y001
6	LD	X001
7	MPS	
8	AND	X003
9	OUT	Y002
10	MPP	
11	AND	X004
12	OUT	Y003

(b) 指令表

图 7-24　一个分支的栈指令使用

图 7-25 为使用了栈存储器中的 2 层的情况。



步序	指令	器件
0	LD	X000
1	MPS	
2	AND	X001
3	MPS	
4	AND	X002
5	OUT	Y000
6	MPP	
7	AND	X003
8	OUT	Y001
9	MPP	
10	AND	X004
11	MPS	
12	AND	X005
13	OUT	Y002
14	MPP	
15	AND	X006
16	OUT	Y003

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-25　二层栈的栈指令使用

7.5.6 MC、MCR 指令

(1) MC(Master Control)主控指令。用于公共串联触点的连接。MC 指令的目标器件为 Y、除特殊辅助继电器以外的 M。执行 MC 指令需 3 个程序步。

(2) MCR(Master Control Reset)主控复位指令。即 MC 指令的复位指令,用于主控结束时返回母线。执行 MCR 指令需 2 个程序步。

这两条指令分别用于设置一个电路块的起点和终点。

如图 7-26 所示,当 X000 常开触点接通时,执行从 MC 到 MCR 的指令;执行 MC 指令后,母线权力从主母线 A 转移到分支母线 B1,在此情况下,与分支母线 B1 连接的第一个触点使用 LD 或 LDI 指令;执行 MCR 指令后,母线权力又从分支母线 B1 返回到主母线 A。由此可见,主控指令 MC/MCR 用于母线权力的转移/返回,以便分支母线的第一个触点也使用 LD 或 LDI 指令。

当 X000 常开触点断开时,位于主控指令区间内的累积定时器、计数器以及用置位/复位指令驱动的器件保持现状;非累积定时器和用 OUT 指令驱动的器件变为 OFF(0)。

在 MC 指令区内再使用 MC 指令称为嵌套。在没有嵌套结构时,通常使用



(a) 梯形图

步序	指令	器件
0	LD	X000
1	MC	N0 M100
4	LD	X001
5	OUT	Y000
6	LD	X002
7	OUT	Y001
8	MCR	N0
10	LD	X003
11	MC	N0 M150
14	LD	X004
15	OUT	Y002
16	LD	X005
17	OUT	Y003
18	MCR	N0
20	LD	X006
21	OUT	Y004

(b) 指令表

图 7-26 MC、MCR **指令**

N0 编制程序，并且 N0 的使用次数没有限制。在有嵌套结构时，MC 嵌套级 N 的编号从 N0→N1→N2→N3→N4→N5→N6→N7 按顺序增大，嵌套级最大为 8 级（即最大为 N7）；在使用 MCR 指令后，嵌套级从大的 N 编号开始返回（即 N7→N6→N5→N4→N3→N2→N1→N0）。

嵌套结构的应用如图 7-27 所示。对于 N0 级，在 X000 为 ON 时，分支母线 B 呈激活状态，通过 MCR N0，母线返回到最初的 A 状态；对于 N1 级，在 X000、X002 为 ON 时，分支母线 C 呈激活状态，通过 MCR N1，母线返回到 B 的状态；对于 N2 级，在 X000、X002、X004 为 ON 时，分支母线 D 呈激活状态，通过 MCR N2，母线返回到 C 的状态；因此，Y005 的接通/断开只取决于 X010 的接通/断开状态，而与 X000、X002、X004 的状态无关。

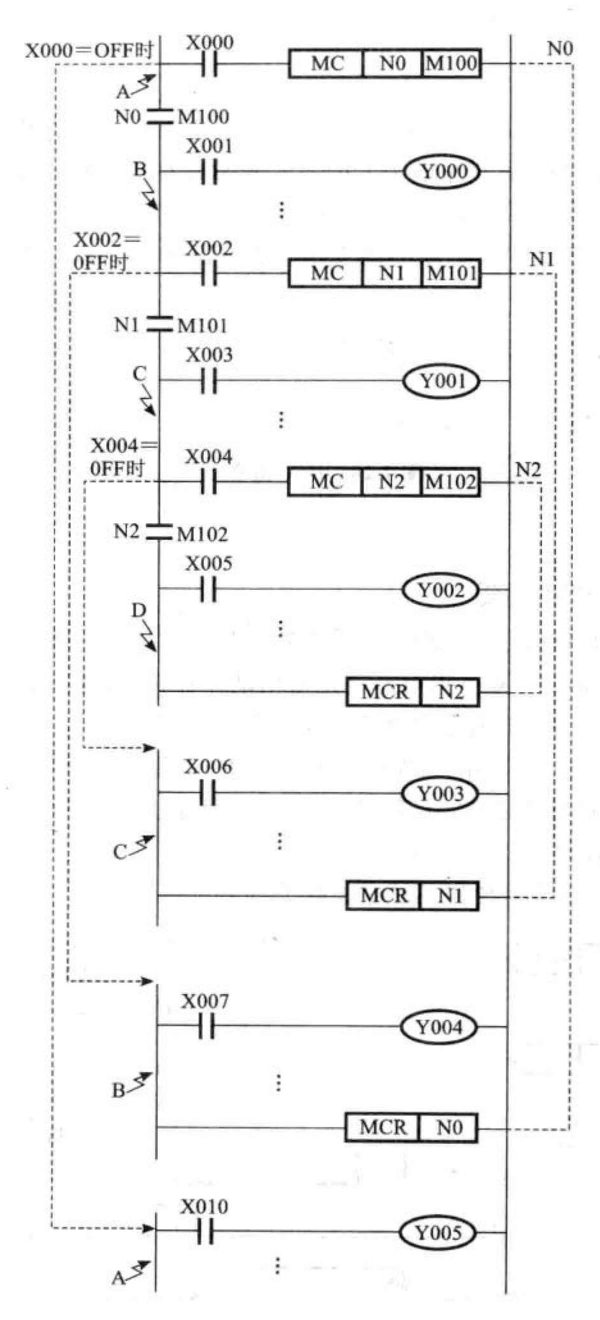


图 7-27 MC 指令的嵌套

7.5.7 INV 指令

INV(Inverse)为取反指令。它是将 INV 指令执行之前的运算结果取反，即指令执行之前的运算结果若为 OFF(0)，则取反变为 ON(1)；若为 ON(1)，则变为 OFF(0)。它无目标器件。执行该指令需 1 个程序步。

在图 7-28 中，若 X001 为 0，则 Y000 为 1；若 X001 为 1，则 Y000 为 0。

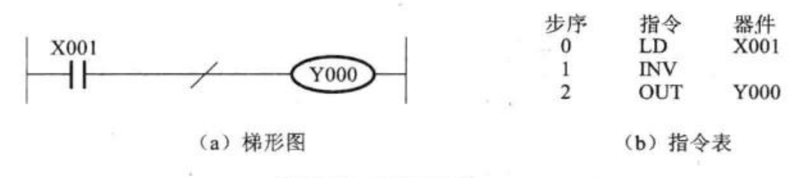


图 7-28　INV 指令

7.5.8 SET、RST 指令

(1) SET 置位指令。该指令是使动作保持的指令。其目标器件为 Y、M、S。

(2) RST(Reset)复位指令。它是撤销动作保持(动作复位)或当前值及寄存器清零的指令。其目标器件为 Y、M、S、T、C、D、V、Z。

对于 SET 和 RST 指令，若目标元件为 Y、M，则需 1 个程序步；若目标元件为 S 及特殊辅助继电器 M、T 和 C，则需 2 个程序步；若目标元件为 D、V、Z 及特殊 D 寄存器，则需 3 个程序步。

SET、RST 指令的使用及时序如图 7-29 所示。

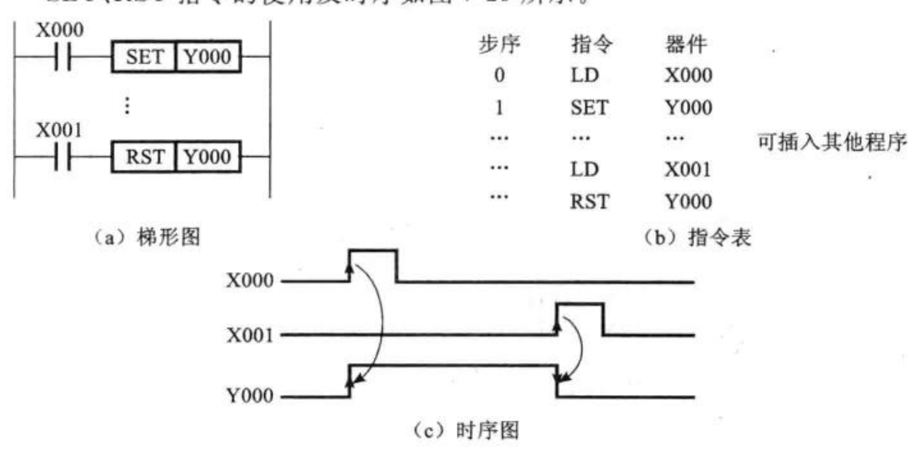


图 7-29　SET、RST 指令

若 SET 指令的条件发生 0→1 的跳变，即 X000 的常开触点闭合（为 1），则 Y000 的线圈为 1（ON）并保持该状态，即使 X000 的常开触点断开，Y000 仍保持为 1 的状态，这称为置位功能。要解除置位，须使用 RST 复位指令。若 RST 指令的条件发生 0→1 的跳变，即 X001 的常开触点闭合（为 1），则 Y000 的线圈被复位为 0（OFF）并保持该状态。对辅助继电器 M、状态 S，也是同样的应用方法。对于同一器件，SET、RST 可多次使用，顺序也可随意，但最后执行的指令有效。

可使用 RST 指令，对数据寄存器 D、变址寄存器 V 和 Z 的内容清零，也能对累积定时器 T246～T255 的当前值及触点复位。

7.5.9 LDP、ANDP、ORP、LDF、ANDF、ORF 指令

LDP、ANDP、ORP、LDF、ANDF 和 ORF 指令统称为边沿检测触点指令。

1. LDP、ANDP 和 ORP 指令

LDP（取脉冲上升沿）、ANDP（与脉冲上升沿）和 ORP（或脉冲上升沿）指令是进行上升沿检测的触点指令，仅在指定位元件的上升沿（OFF→ON）时接通一个扫描工作周期。其目标元件均为 X、Y、M、S、T、C。执行这些指令都需 3 个程序步。

LDP 用于左边母线或一个电路块开始的上升沿检测触点；ANDP 用于串联一个上升沿检测触点；ORP 用于并联一个上升沿检测触点。

2. LDF、ANDF 和 ORF 指令

LDF（取脉冲下降沿）、ANDF（与脉冲下降沿）和 ORF（或脉冲下降沿）指令是进行下降沿检测的触点指令，仅在指定位元件的下降沿（ON→OFF）时接通一个扫描周期。其目标元件均为 X、Y、M、S、T、C。执行这些指令都需 3 个程序步。

LDF 用于左边母线或一个电路块开始的下降沿检测触点；ANDF 用于串联一个下降沿检测触点；ORF 用于并联一个下降沿检测触点。

在图 7-30 中，X000（或 X001）由 OFF→ON 或 X002 由 ON→OFF 时，M0 或 M1 仅有一个扫描周期为 ON。

7.5.10 PLS、PLF 指令

（1）PLS（Pulse）为上升沿脉冲输出指令。

（2）PLF（Pulse Falling）为下降沿脉冲输出指令。

PLS、PLF 统称为脉冲输出指令，又称为微分输出指令，它使目标元件输出

(a) 梯形图

步序	指令	器件
0	LDP	X000
2	ORP	X001
4	OUT	M0
5	LD	M8000
6	ANDF	X002
8	OUT	M1

(b) 指令表

(c) 时序图

图 7-30 边沿检测触点指令

脉宽为一个扫描周期的脉冲。PLS 和 PLF 指令的目标元件均为 Y 和除特殊功能以外的辅助继电器 M。执行这些指令需 2 个程序步。

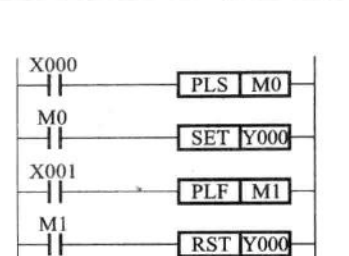
如图 7-31 所示，在 PLS 的输入条件 X000 触点由 OFF→ON(上升沿)时，M0 输出一个扫描周期的脉冲。同样在 PLF 的输入条件 X001 触点由 ON→OFF(下降沿)时，M1 输出一个扫描周期的脉冲。

M0 被驱动为一个扫描周期的三个示例程序如图 7-32 所示。无论是使用 OUT 指令、上升沿触点检测指令，还是使用上升沿脉冲输出指令，当 X000 从 OFF 变为 ON 时，M0 都只有一个扫描周期为 ON。

7.5.11 NOP 指令

NOP(Non Processing)为空操作指令。它无目标元件，执行此指令只需 1 个程序步。

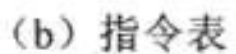
空操作指令使该步序作空操作。在将用户存储器中的程序全部清除后，全部指令变为 NOP 指令。

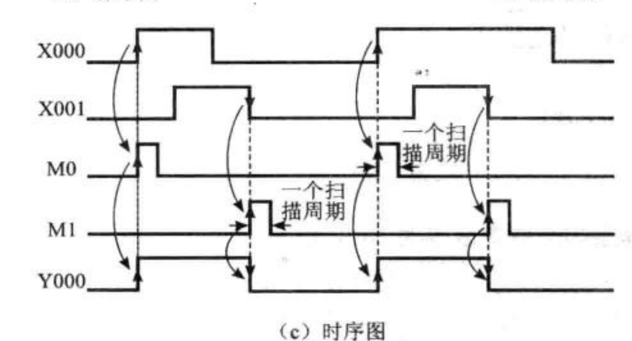


（a）梯形图



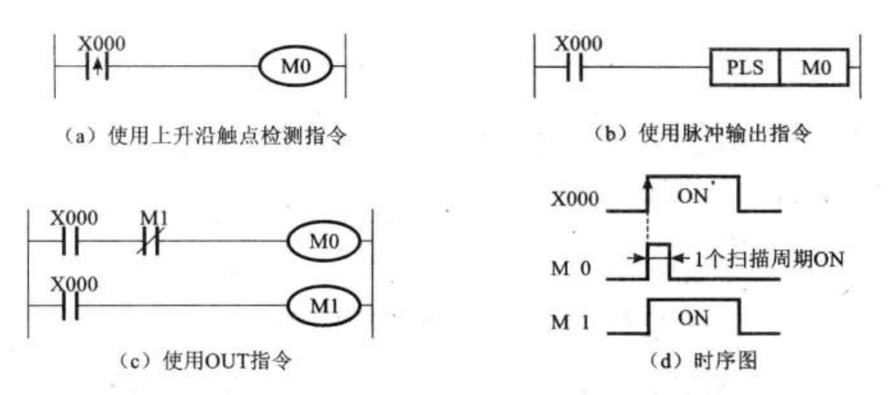
步序	指令	器件
0	LD	X000
1	PLS	M0
3	LD	M0
4	SET	Y000
5	LD	X001
6	PLF	M1
8	LD	M1
9	RST	Y000


（b）指令表



（c）时序图

图 7-31　脉冲输出指令



（a）使用上升沿触点检测指令　（b）使用脉冲输出指令

（c）使用OUT指令　（d）时序图

图 7-32　上升沿脉冲输出指令的使用

1. 程序中插入 NOP 指令

图 7-33(a)所示的梯形图与图 7-33(b)指令表的执行结果相同，这是因为在指令与指令之间插入 NOP 时，PLC 会无视其存在而继续运行(但 NOP 指令占用程序空间)。因此，可在程序中事先加入一些 NOP 指令，当需要修改、增加指令时，可将 NOP 更改为需要的指令，这样可减少步序号的变动次数，但需要程序空间有足够的余量。例如根据某种需要，将图 7-33(b)的 NOP 指令改为图



7-33(d)的 AND 指令，则相应的梯形图如图 7-33(c)所示。

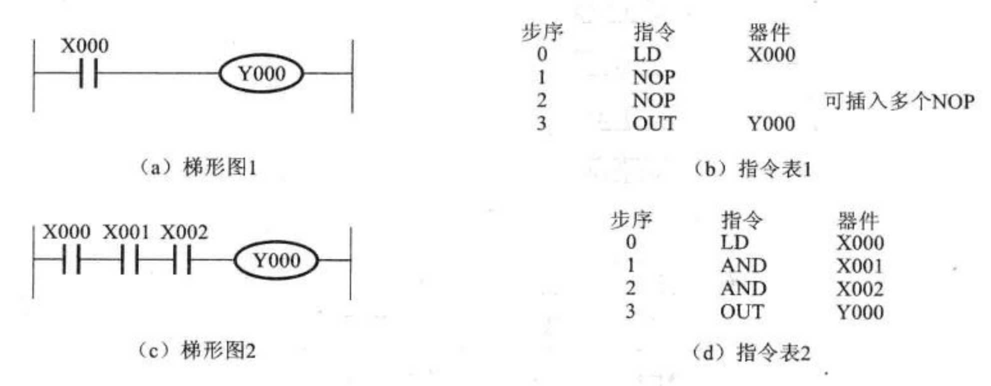


图 7-33　NOP 指令

2. 将程序中某些指令改为 NOP 指令

图 7-34(a)中，将 AND 或 ANI 指令改为 NOP 指令，可使相应触点短路；图 7-34(b)中，将 OR、ORI 指令改为 NOP 指令，可使相应触点断路。由此可见，将程序中某些指令改为 NOP 指令，等同于删除这些指令。

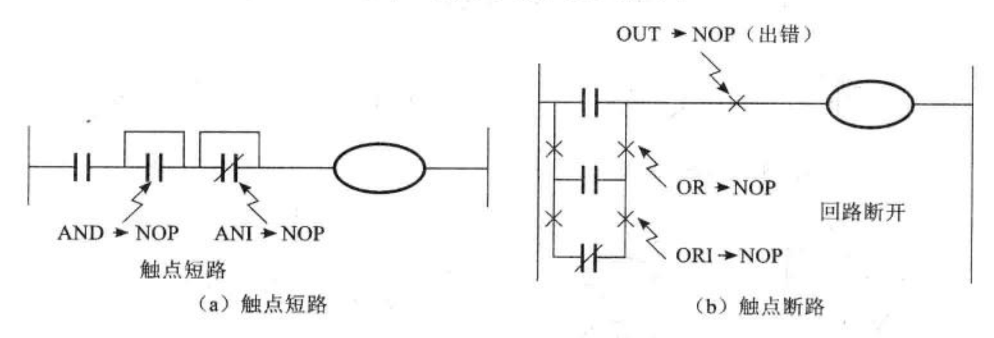


图 7-34　用 NOP 指令使触点短路与断路

上述 NOP 指令的使用，主要用于程序调试。需注意，在将 NOP 指令修改为其他指令或将某些指令修改为 NOP 指令时，会使梯形图结构发生变化，有时甚至出现错误，因此，在最终程序中，应尽可能少用或不用该指令。

7.5.12　END 指令

END 为结束指令，表示程序结束。

可编程控制器反复进行输入采样、程序执行和输出刷新。若在程序的某处写入 END 指令，则执行到 END 指令时，END 以后的程序步不再执行，而直接

进行输出刷新。在程序中没有 END 指令时，FX 系列 PLC 一直处理到用户程序存储器中最后一个程序步。

在调试程序时，可把 END 指令加插在某一个梯级之尾部，然后试运行，确认正确后删除 END 指令，再在其后的某一梯级尾部加上 END 指令试运行。这样就可以十分容易地找出编程错误的部分。

7.6 定时器(T)、计数器(C)的使用

7.6.1 定时器(T)的使用

在 FX 系列 PLC 中，定时器相当于通电延时时间继电器，分为通用型和累积型两种。其编号按十进制分配，具体情况请参考表 7-4。另外，FX_{1S} 和 FX_{1N} 系列 PLC 内置两个模拟电位器，用于制作模拟定时器。

定时器中有一个设定值寄存器、一个当前值计数器和用来存储其输出状态的映像寄存器(占一个存储单元的一位)，这 3 个存储器使用同一个元件号。常数 K 作为定时器的设定值，其范围为 1～32767，该设定值也可用数据寄存器 D 的内容进行间接指定。

1. 通用型定时器

通用型定时器的时针周期有 10 ms、100 ms 两种。T0～T199 为 100 ms 定时器，定时范围为 0.1～3276.7 s，其中 T192～T199 为子程序和中断程序专用的定时器；T200～T245 为 10 ms 定时器，定时范围为 0.01～327.67 s。

如图 7-35 所示，无论何时，只要 X000 常开触点断开，T200 的驱动条件为 0，则 T200 复位，即其触点复位，并且它的当前值清零，因此 Y000 为 0；当 X000 常开触点接通时，T200 的驱动条件为 1，T200 开始计时，即当前值计数器每隔 10 ms 加 1，当前值等于设定值时，即延时时间 1.23 s 到时，定时器输出为 1，其触点动作，T200 常开触点闭合，Y000 为 1；此后，只要 X000 常开触点一直闭合，则 T200 处于保持状态。由此可知，定时器有复位、计时(实际是对给定时钟周期脉冲进行计数)以及保持 3 个状态。

2. 累积型定时器

累积型定时器的时针周期有 1 ms、100 ms 两种。T246～T249 为 1 ms 累



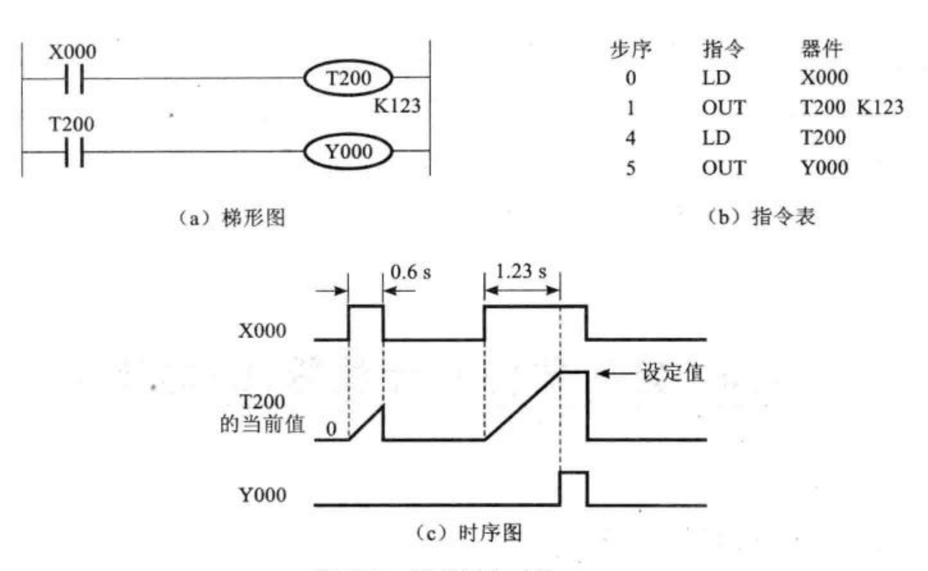


图 7-35 通用型定时器

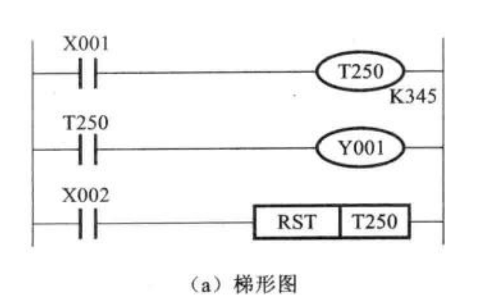
积型定时器，定时范围为 0.001～32.767 s；T250～T255 为 100 ms 累积型定时器，定时范围为 0.1～3276.7 s。

如图 7-36 所示，当 X001 的常开触点闭合时，T250 开始计时，即当前值计数器每隔100 ms加 1(实际上是该计数器对周期为 100 ms 的脉冲进行计数)，若该值达到设定值 345 时，即 34.5 s 的延时时间到时，定时器的输出触点动作，T250 的常开触点闭合，Y001 为 1。在当前值计数器累计加 1 过程中，即使 X001 触点断开或 PLC 断电，当前值保持不变；当 X001 触点再次闭合或 PLC 再复电起动运行时，当前值计数器继续累计加 1 计时，其“累积”的意义就在于此。如果 X002 触点闭合，则 T250 定时器复位，T250 常开触点断开(0)，Y001 为 0。请注意，由于累积型定时器的线圈在输入条件为 0 时，处于保持状态(通用型则复位)，因此要复位累积型定时器需用 RST 复位指令。

3. 模拟电位器

FX_{1S}、FX_{1N}和 FX_{3G}系列 PLC 的顶部内置有两个模拟电位器 VR1 和 VR2，电位器最小刻度对应数值 0，最大刻度对应数值 255，将电位器拧到某刻度，则相应以 0～255 中的某数值数据存储在特殊数据寄存器 D8030 和 D8031 中，即 VR1→D8030(0～255 的整数)，VR2→D8031(0～255 的整数)。通过将 D8030 或 D8031 中的数据间接指定为定时器的设定值，可制作电位器型的模拟定时器。

如图 7-37 所示，定时器 T10 的设定值为 VR1 电位器拧到某刻度处的值，

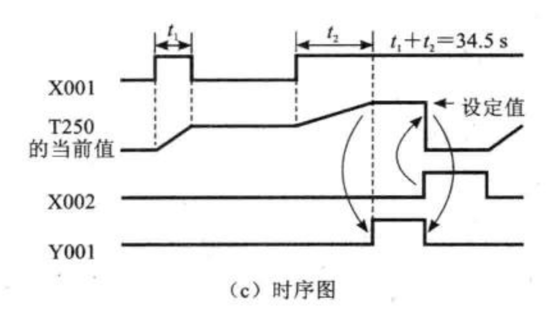


（a）梯形图



步序	指令	器件
0	LD	X001
1	OUT	T250 K345
4	LD	T250
5	OUT	Y001
6	LD	X002
7	RST	T250

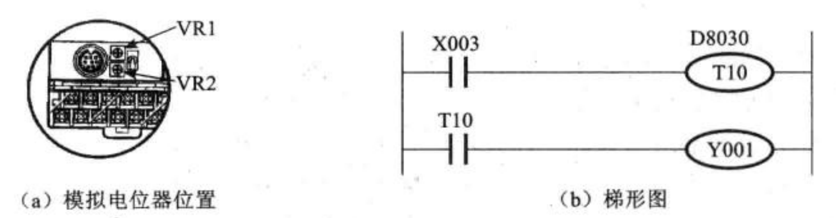
（b）指令表



（c）时序图

图 7-36　累积型定时器

该值保存在 D8030 数据寄存器中，由于 T10 的计时时钟为 100 ms，故 T10 的定时时间为 0～25.5 s。



（a）模拟电位器位置　　（b）梯形图

图 7-37　模拟电位器

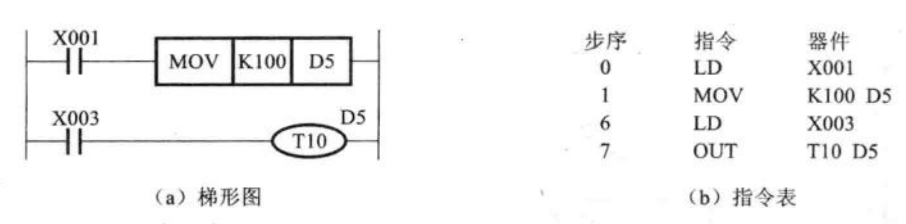
4. 定时器设定值 K 的指定方法

设定值 K 为十进制数，范围为 1～32767。有两种方法指定常数 K，第一种方法如上述示例，在梯形图中直接指定常数 K；第二种方法如图 7-38 所示，通过数据寄存器间接指定，传送指令 MOV 将常数 100 传送到 D5 数据寄存器中。

5. 定时器的定时精度

从驱动定时器线圈开始到定时器触点动作结束的定时器偏差约为 $+T_0$（扫描周期）～$-\alpha$。对应于 1 ms、10 ms 和 100 ms 定时器，α 分别为 1 ms、10 ms 和 100 ms。





步序	指令	器件
0	LD	X001
1	MOV	K100 D5
6	LD	X003
7	OUT	T10 D5

（a）梯形图　　（b）指令表

图 7-38　用数据寄存器 D 指定定时器设定值 K

当定时器的设定值为 0 时，在执行下一个工作周期的定时器线圈指令时，定时器的输出触点开始动作。

7.6.2　计数器(C)的使用

1. 内部计数器

内部计数器分为 16 位（二进制）加计数器和 32 位加/减计数器，其编号按十进制分配，具体情况请参考表 7-5。内部计数器可对 PLC 的 X、Y、M 和 S 等内部信号进行计数。

1）16 位加计数器

16 位加计数器分为通用型和断电保持型两种，其设定值为 1～32767 内的整数（即十进制常数 K 的范围）。

（1）通用型

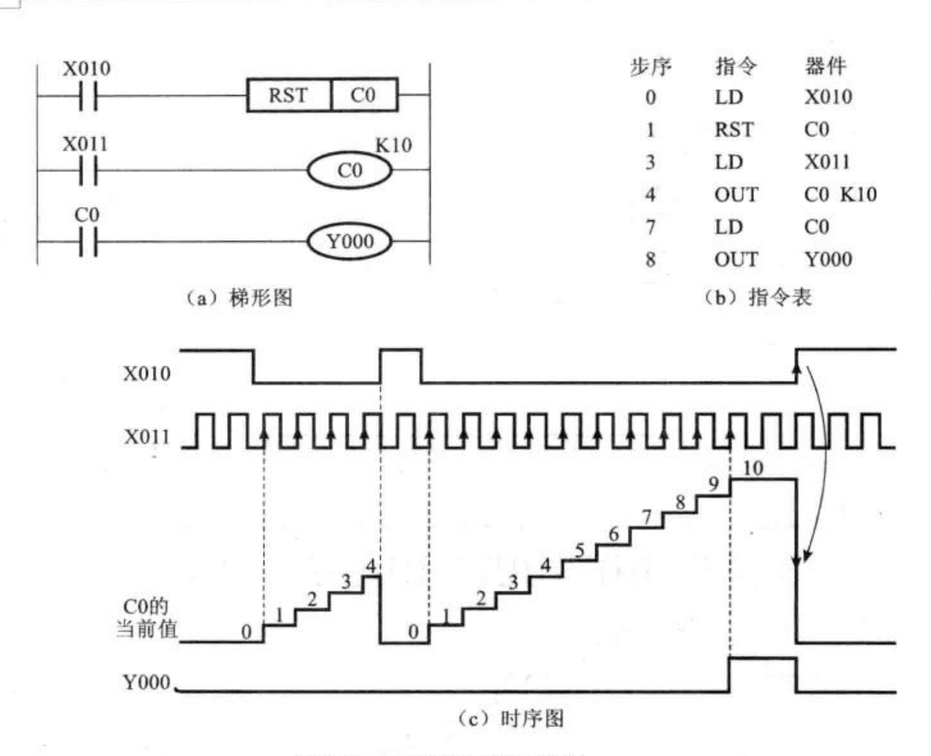
如图 7-39 所示，无论何时只要 X010 常开触点闭合，计数器就复位，其当前值清零，并且其输出触点复位，此时 Y000 为 0；当复位输入为 0 即 X010 常开触点断开时，计数器对输入脉冲计数，X011 常开触点由断开到闭合，产生 0→1 的跳变（脉冲的上升沿），计数器的当前值累计加 1，当计数器 C0 的输入脉冲达到 10 个时，其当前值也为 10 且等于设定值，计数器输出为 1，其输出触点动作，C0 常开触点闭合，Y000 为 1；此后，只要 X010 常开触点断开，尽管计数器 C0 仍有脉冲输入，但是计数器不再计数且保持当前值不变，其触点也保持现时状态。由上述可知，计数器有复位、计数以及保持三个状态。

（2）断电保持型

若切断 PLC 的电源，则通用型计数器的当前值被清零，输出触点复位；而断电型计数器会保存断电前的当前值以及输出触点的动作或复位状态，因此，当复电且重新起动 PLC 时，计数器按上一次保存的当前值累计计数。

2）32 位加/减计数器

32 位加/减计数器也分为通用型和断电保持型两种，其中 C200～C219 为



步序	指令	器件
0	LD	X010
1	RST	C0
3	LD	X011
4	OUT	C0 K10
7	LD	C0
8	OUT	Y000

（a）梯形图　　（b）指令表

（c）时序图

图 7-39　16 位通用型计数器

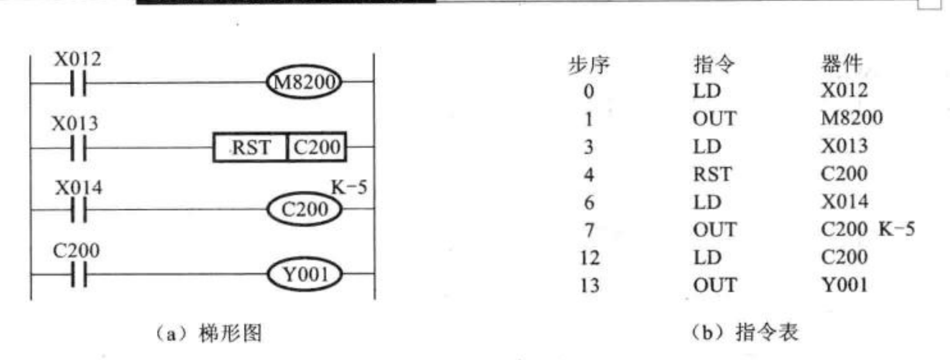
通用型，C220～C234 为断电保持型。其设定值 K 为－2,147,483,648～＋2,147,483,647 内的整数，可为正数也可为负数。

C200～C234 的加/减计数方向由特殊辅助继电器 M8200～M8234 指定，与计数器编号对应的特殊辅助继电器为 0 时，为加计数；为 1 时，为减计数。在加计数方向，当前值累计加 1 到达设定值时，计数器的输出触点动作（常开触点闭合，常闭触点断开）；在减计数方向，当前值累计减 1 到达设定值且再减 1 后，计数器的输出触点复位（常开触点断开，常闭触点闭合）。

（1）通用型

如图 7-40 所示，M8200（由 X012 决定）决定 C200 的计数方向。无论何时，只要 X013 闭合，计数器 C200 被复位，当前值清零，计数器的输出触点复位，Y001 为 0；当 X013 断开，计数器 C200 对 X014 的脉冲进行计数。在减 1 计数过程中，当前值由－5 减 1 到达－6 时，C200 的输出触点复位，Y001 为 0；在加 1 计数过程中，当前值由－6 加 1 到达－5 时，C200 的输出触点动作，Y001 为 1。

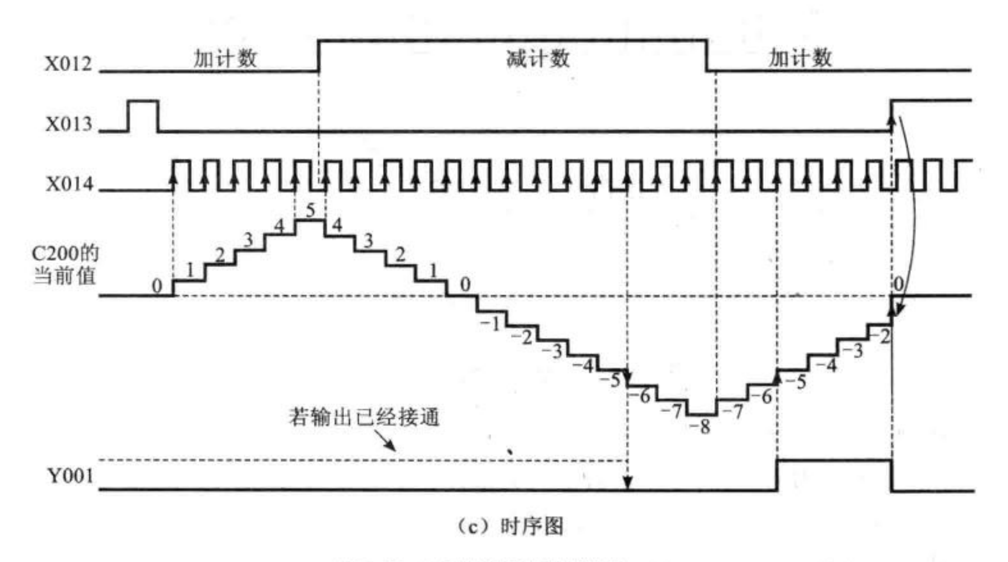
在使用通用型计数器时，若 PLC 断电，则计数器的当前值清零，输出触点复位。



(a) 梯形图

步序	指令	器件
0	LD	X012
1	OUT	M8200
3	LD	X013
4	RST	C200
6	LD	X014
7	OUT	C200 K-5
12	LD	C200
13	OUT	Y001

(b) 指令表



(c) 时序图

图 7-40　32 位通用型计数器

(2) 断电保持型

在使用断电保持型计数器时，若 PLC 断电，则计数器的当前值以及输出触点的动作或复位状态被保存，在 PLC 来电再运行时，该计数器恢复断电时保存的状态。

3) 计数器设定值 K 的指定方法

16 位加计数器和 32 位加/减计数器的设定值都有两种指定方法。第一种方法如上述图例所示，设定值以常数直接指定。第二种方法是以数据寄存器 D 间接指定，在使用计数器线圈之前，须预先在程序中将设定值写入数据寄存器或通过数字开关输入。

16 位加计数器通过数据寄存器 D 间接指定设定值的方法如图 7-41 所示。

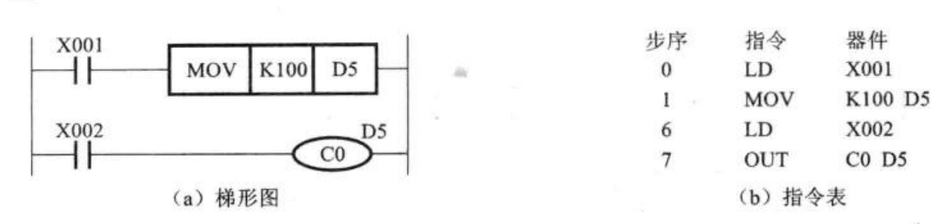


图 7-41 用数据寄存器 D 指定 16 位计数器设定值

32 位加/减计数器通过数据寄存器 D 间接指定设定值时，设定值存放在指定编号及其后续编号的两个相连数据寄存器中，如图 7-42 所示，设定值存放在 D6、D5 中。请注意，由于是 32 位传送，在程序的其他地方，不要重复使用这些数据寄存器，并且须使用 DMOV 指令。

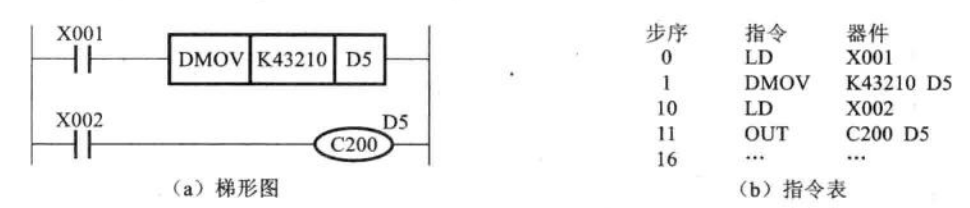


图 7-42 用数据寄存器 D 指定 32 位计数器设定值

4）计数器的响应速度

计数器可对 PLC 的内部信号 X、Y、M、S、C 等触点的动作进行循环扫描并计数。但响应速度通常在数十赫兹以下，内部计数器输入信号接通和断开的持续时间，必须大于可编程控制器的扫描周期。要提高响应速度，须使用高速计数器；要响应速度与扫描周期无关，须使高速计数器通过对特定的输入作中断处理来进行计数。

2. 高速计数器

高速计数器编号为 C235～C255，最多为其中的 6 点。如表 7-8 所示，高速计数器的计数脉冲输入端只有 X000～X007 共 8 个，当某个输入端被一个高速计数器使用时，其他高速计数器不能再重复使用这个输入端，如 X000 作 C235 的计数输入端时，C241、C244、C246、C247、C249、C251、C252、C254 和中断“I00□”就不能再使用 X000 作计数输入端；这些输入端不被高速计数器使用时，可用于一般输入。

这些高速计数器均为 32 位加/减计数器。C235～C245 为单相单计数输入计数器，其中 C235～C240 无起动和复位输入端，C241～C243 有复位输入端，C244～C245有复位和起动输入端；C246～C250为单相双计数输入计数器，其



表 7-8　高速计数器

输入端子	单相单计数输入											单相双计数输入					双相双计数输入				
	C235	C236	C237	C238	C239	C240	C241	C242	C243	C244	C245	C246	C247	C248	C249	C250	C251	C252	C253	C254	C255
X000	加/减						加/减			加/减		加	加		加		A 相	A 相		A 相	
X001		加/减					复位			复位		减	减		减		B 相	B 相		B 相	
X002			加/减					加/减			加/减		复位		复位			复位		复位	
X003				加/减				复位			复位			加		加			A 相		A 相
X004					加/减				加/减					减		减			B 相		B 相
X005						加/减			复位					复位		复位			复位		复位
X006										起动					起动					起动	
X007											起动					起动					起动

中 C246 无起动和复位输入端，C247 和 C248 有复位输入端，C249～C250 有复位和起动输入端；C251～C255 为双相双计数输入计数器，其中 C251 无起动和复位输入端，C252～C253 有复位输入端，C254～C255 有复位和起动输入端。

高速计数器的计数输入脉冲为上升沿有效，当计数输入端输入信号为上升沿时，通过中断使高速计数器立即计数，即高速计数器对输入信号的计数不受 PLC 扫描周期的影响。

与内部计数器一样，高速计数器复位时，其当前值清零，触点也复位；同样，在加计数过程中，计数器的当前值增加达到设定值时，计数器的输出触点动作；在减计数过程中，计数器的当前值到达设定值再减 1 时，计数器的输出触点复位。

21 个高速计数器有不同的响应频率，即使是同一个高速计数器，在不同 FX 系列 PLC 中的响应频率也有所不同。以 FX_{1N}、FX_{2N} 系列 PLC 为例，C235、C236 和 C246 的响应频率最高为 60 kHz，C251 最高为 30 kHz，C237～C245、C247～C250 最高为10 kHz，C252～C255 最高为 5 kHz。

1）单相单计数输入高速计数器

C235～C245 单相高速计数器的计数方向由 M8235～M8245 中对应编号的内部继电器决定，即 M8XXX 为 1，CXXX 为减计数；M8XXX 为 0，CXXX 为加计数。

图 7-43 为单相单输入实例。在 X012 触点为 1 时，若起动输入端 X006 也为 1，则 C244 立即开始计数，计数对象为 X000 端的输入脉冲（脉冲上升沿有效）；X010 闭合时，M8244 为 1，C244 对 X000 端的脉冲进行减计数；X010 断开时，M8244 为 0，C244 对 X000 端的脉冲进行加计数。当 X001 端为 1 时，C244 立即被复位，也可以在程序中通过 X011 对 C244 进行复位。

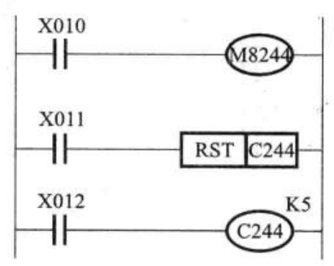


图 7-43 单相单计数输入高速计数器

2）单相双计数输入高速计数器

图 7-44 为单相双输入实例。在 X012 触点为 1 时，若起动输入端 X006 也为 1，则 C249 立即开始计数；若 X000 端有一输入脉冲，则 C249 的当前值加 1；若 X001 端有一输入脉冲，则 C249 的当前值减 1；当 X002 端为 1 时，C249 立即被复位，也可以在程序中通过 X011 对 C249 进行复位。

要想知道单相双计数输入高速计数器 CXXX 处于何种计数状态，可查看与

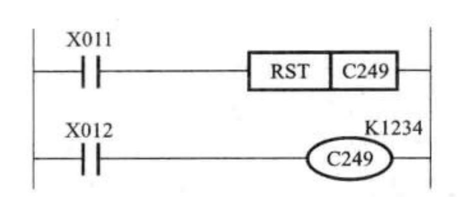
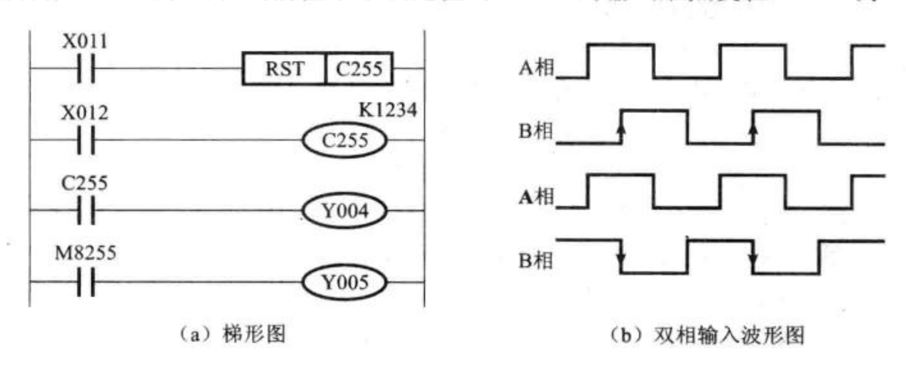


图 7-44　单相双计数输入高速计数器

CXXX 编号相对应的 M8XXX。若 M8XXX 为 0，则 CXXX 为加计数；若 M8XXX 为 1，则 CXXX 为减计数。

3）双相高速计数器

图 7-45 为双相高速计数器实例。在 X012 触点为 1 时，若起动输入端 X007 也为 1，则 C255 立即开始计数；它是通过中断对计数输入端 X003(A 相)、X004(B 相)的信号进行计数；当 X005 端为 1 时，C255 立即被复位，也可以在程序中通过 X011 对 C255 进行复位。在 C255 的当前值大于设定值时，C255 的输出触点动作，Y004 为 1；在当前值小于设定值时，C255 的输出触点复位，Y004 为 0。



（a）梯形图　　（b）双相输入波形图

图 7-45　双相高速计数器

当 A 相信号为 1 时，在 B 相信号的上升沿，计数器加 1；当 A 相信号为 1 时，在 B 相信号的下降沿，计数器减 1。同样，可根据与 CXXX 编号对应的 M8XXX 的状态，检查 CXXX 的计数方向。若 Y005 为 0(M8255 为 0)，则 C255 为加计数；反之，若 Y005 为 1(M8255 为 1)，则 C255 为减计数。双相式编码器输出的是有 90°相位差的 A 相和 B 相信号，可以在电动机的旋转轴上安装这种 A-B 相编码器，再将 A、B 相线连接到 PLC，在轴正转时自动加计数，在轴反转时自动减计数，从而可以计算旋转轴的角位移量。

7.7 步进梯形图指令

7.7.1 SFC及步进梯形图指令

STL(Step Ladder)为步进梯形图指令,RET(Return)为步进梯形图结束指令。

该两条指令分别占1个程序步。STL指令的目标元件为S,并且使用常开触点(专用符号┤▌▌├),称为STL触点。

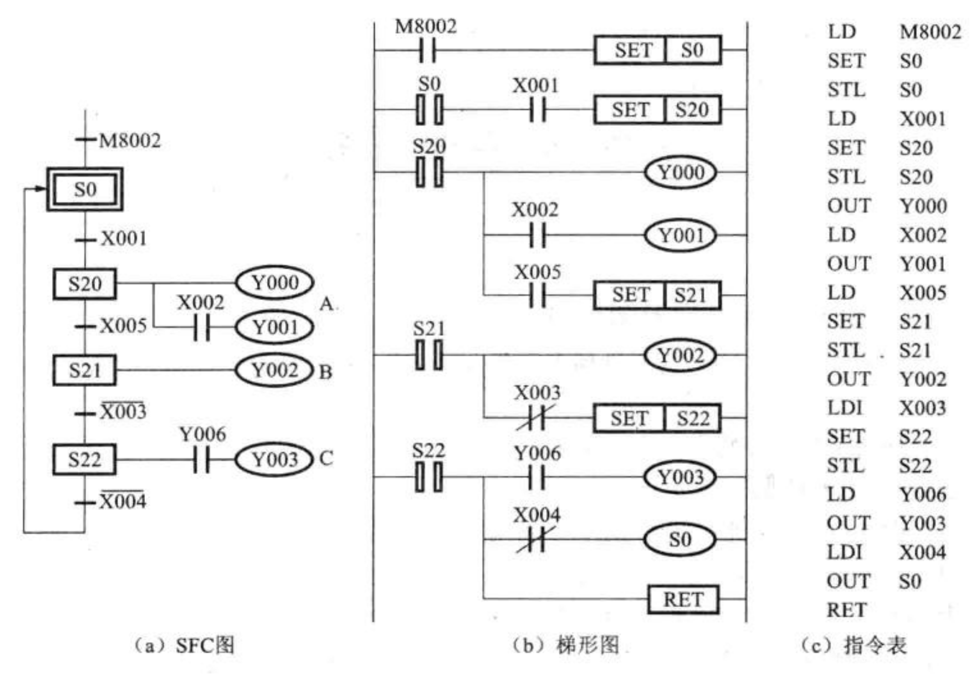
图7-46为某机械设备的顺序控制程序。在PLC从STOP→RUN时,M8002输出一个初始脉冲,S0置位为1,在起动输入端X001为1时,S20置位为1;S20为1,则Y000输出为1,Y001随X002的状态而输出,受控的机械设备进行A动作,同时自动复位上一状态S0;当A动作完成时X005为1,则置S21为1,并且自动复位上一状态S20,同样因S21为1,则Y002输出为1,机械设备进行B动作;当B动作完成时X003为0,则置S22为1,然后自动复位S21,Y003随Y006的状态而输出,机械设备进行C动作;当C动作完成时使X004为0,则置S0为1,然后自动复位S22,至此机械设备完成一个顺序控制周期。

由上可知,步进梯形图指令用于步进式(或称步序式)控制,使编写这种步进控制程序变得比较简单。

图7-46(a)为对应的SFC(Sequential Function Chart)顺序功能图(或称状态转移图)。SFC图与步进梯形图可相互转换,在PLC程序中都可使用,但使用时需相应的外围设备和编程软件。从以上分析可知,顺序功能图有三个主要要素:状态(步)、转换条件及驱动负载。

STL触点驱动的电路块具有三个功能,即对负载的驱动处理、指定转换条件和指定转换目标。当某步为活动步时,对应的STL触点接通,该步的负载被驱动(或满足某条件时被驱动),当该步后面的转换条件满足时,转换实现,即后续对应的状态寄存器被SET指令置位,后续步变为活动步,然后当前状态寄存器被复位,其对应的STL触点断开。

通常S0～S9用于初始状态,这是因为从指令表逆转换为SFC程序时,需要识别初始状态;用S0～S9以外的状态作初始状态时,则不能执行逆转换。S10



(a) SFC图　　(b) 梯形图　　(c) 指令表

图 7-46 STL、RET 指令

～S19 用于返回原点，其他状态为通用。初始状态也由其他状态驱动，如图 7-46(b)中的 S0 由 S22 驱动，但在程序的开始部分，需通过其他手段来驱动，如图 7-46(b)中程序的开始由 M8002 驱动 S0。初始状态以外的状态必须通过其他状态来驱动。

当 S 不用于 STL 步进梯形指令时，可当辅助继电器一样使用，即可使用 LD、LDI、AND、ANI、OR、ORI、SET、RST 和 OUT 等指令，此时触点使用通用的触点符号。

7.7.2　STL 指令的特点

STL 指令具有如下特点。

(1) 最后一个步进梯形指令结束时一定要使用 RET 指令。

(2) 如图 7-47 所示，与 STL 触点右侧相连的触点应使用 LD 或 LDI 指令，即母线从主母线转移到 STL 触点右侧的内母线，不能在内母线上直接使用 MPS、MRD 和 MPP 指令，在 LD 指令后方可使用这些指令。

(3) 在内母线上，一旦写入 LD 或 LDI 指令后，对没有触点控制的线圈就不

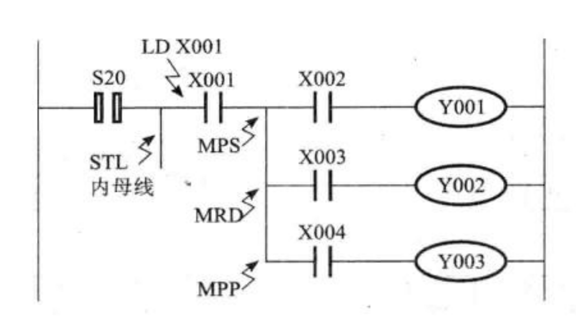


图 7-47 步进梯形图指令编写

能再编程，改正的方法是将该线圈放在 STL 指令所控制电路块的最上面。如图 7-46 所示，若 Y000 线圈支路位于 Y001 线圈支路的下面，则无法对 Y000 线圈编写程序，也不能使用 OUT 指令。

(4) STL 触点断开时，不执行该触点的电路块程序，即只执行活动步对应的程序。在没有并行序列时，任何时候只执行一个活动步，因此可大大缩短程序执行时间。

(5) 使用 STL 指令时，不同步进梯形电路块内允许使用同一编号的线圈，因为在一个工作周期内，只有一个活动步，对该线圈只有一条 OUT 指令被执行。

(6) STL 触点驱动的电路块中不能使用 MC 和 MCR 主控指令；子程序和中断子程序中不可以使用 STL 指令；建议不要在状态中使用跳转指令，否则会产生意想不到的复杂动作。

(7) 若下一状态 S 置位的 SET 指令不在 STL 驱动的电路块内，则执行该置位指令时，不能自动复位上一状态 S。对步进式控制，下一状态的置位指令须放在 STL 驱动的电路块内，并且一般放在该电路块的最后。

(8) 图 7-46(b)中，梯形图最后的 S0 用 OUT 指令而不是用 SET 指令。在步进梯形图中，对于 STL 指令后的状态 S，OUT 指令与 SET 指令具有相同的功能，都能复位 STL 触点，并使状态 S 具有自保持功能(如梯形图中最后的 S0)，但是 OUT 指令用于向分离的状态 S 转移(非顺序编号的状态 S)。

7.7.3 选择性分支和并行分支

可选择地执行多项流程中的某一流程被称为选择性分支，如图 7-48(a)所示。多项流程可同时进行的分支称为并行分支，如图 7-48(b)所示。一条选择性分支或并行分支的分支数最多为 8 条。

(a) 选择性分支　　(b) 并行分支

图 7-48　选择性分支和并行分支

7.8　功能指令

FX 系列可编程控制器除了用于开关量控制的基本逻辑指令和步进指令外，为适应其他控制要求，还有许多功能指令，其分类情况如下：

(1) 程序控制指令(FNC 00～FNC 09)；

(2) 传送与比较指令(FNC 10～FNC 19)；

(3) 算术和逻辑运算指令(FNC 20～FNC 29)；

(4) 循环与移位指令(FNC 30～FNC 39)；

(5) 数据处理指令(FNC 40～FNC 49)；

(6) 高速处理指令(FNC 50～FNC 59)；

(7) 方便指令(FNC 60～FNC 69)；

(8) 外部设备 I/O 指令(FNC 70～FNC 79)；

(9) 外部设备 SER(设备选项)指令(FNC 80～FNC 89)；

(10) 其他指令(FNC 90～FNC 299)(FX_{1S}、FX_{1N}、FX_{2N}系列最大编号为 FNC 246，FX_{3U}、FX_{3G}系列又增加了许多指令，最大编号为 FNC 299)。

各分类的具体指令可参考相应 FX 系列可编程控制器的指令手册，本教材

只讲述常用的功能指令。

7.8.1 功能指令的基本知识

1. 功能指令的格式

功能指令的格式如图 7-49 所示。FNC XX 中的 XX 表示功能编号；MEAN（取平均值）和 MOV（传送）是编号为 45 和 12 的功能指令的助记符；[S]表示源操作数（Source），源操作数不随指令的执行而改变；[D]表示目的操作数（Destination），目的操作数随指令的执行而改变；若可以使用变址功能，则表示为[S・]和[D・]。用 n 和 m 表示其他操作数（常数），当使用十进制数时用 K 表示，使用十六进制数时用 H 表示。当源操作数、目的操作数和其他操作数很多时，可分别表示为[S1・]、[S2・]、[D1・]、[D2・]、n1、n2、m1、m2 等。

图 7-49 所示的助记符指令中的"()"为可选项，但不包括"("和")"，如(D)MOV(P)指令可为 MOV、DMOV、MOVP 或 DMOVP。

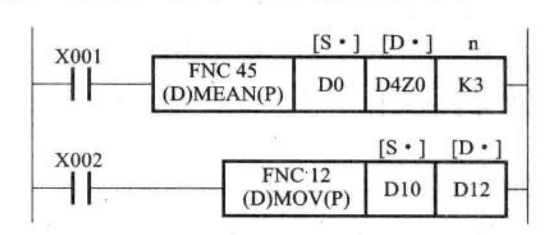


图 7-49 功能指令格式

1) 16 位与 32 位指令

在功能指令中，源操作数和目的操作数的位长有 16 位或 32 位（二进制位）两种。如图 7-49 的 MOV 指令，没有 D(Double)符号，表示操作数为 16 位；有 D 符号，表示操作数为 32 位。

在 32 位操作时，指令中只给出低 16 位的地址、隐含了高 16 位的地址，如图 7-49 所示，若为 DMOV 指令，则源操作数为([S・]+1，[S・])，即(D11D10)，[S・]即 D10 为低 16 位，([S・]+1)即 D11 为高 16 位；目的操作数为([D・]+1，[D・])，即(D13D12)，[D・]即 D12 为低 16 位，([D・]+1)即 D13 为高 16 位。在 32 位操作时，为了避免编号重复，建议指令中使用偶数编号的地址。

2) 连续执行型与脉冲执行型指令

在指令中，没有 P(Pulse)符号表示连续执行型指令，有 P 符号表示脉冲执行型（上升沿有效）指令。如图 7-49，对连续执行型指令 MOV，若 X002 为 1，则在 PLC 的每个工作周期都执行，因此，在 PLC 的每个工作周期，目的操作数的



内容都改变；对脉冲执行型指令 MOVP，它总是只在 X002 从 0→1(OFF→ON)变化时执行一次，在其他时刻不执行，故目的操作数的内容只在 X002 从 0→1 时改变。如果不需要每个工作周期都执行指令，使用脉冲执行型指令可缩短处理时间。

根据需要，D 和 P 可同时使用。

在使用手持编程器编程时，先按“FNC”键，再输入功能指令的编号，如 12、D12、D12P，不能在手持编程器上直接输入指令助记符。按编程器上的“HELP”键，可以显示功能编号与助记符的对照表。

使用 PC 机编程时，在编程软件上可直接输入助记符指令，如 MOV、DMOV、MOVP、DMOVP。在当今笔记本电脑普及的情况下，需要记忆和经常使用的是助记符指令，故在后叙指令格式及应用时，在大部分梯形图中不再标注功能编号“FNC XXX”。

2. 位软元件和字软元件

存放操作数的软元件有位软元件和字软元件。只有 0 和 1(OFF 和 ON)状态的元件称为位(Bit)软元件，FX 系列 PLC 中为位软元件的有 X、Y、M 和 S；存储多位数据的元件称为字软元件，一个字由 16 位二进制数组成，为字软元件的有 T、C 和 D 等。

位软元件可以组成字软元件。功能指令所处理的数据为 16 位或 32 位，如图 7-49 所示，用 D 符号区别。

3. 位软元件的组合

位软元件组合起来可以表示数据，有些功能指令可以处理这样的数据(操作数)。

每 4 个编号连续的位软元件组成一组，代表 4 位 BCD 码，也表示 1 位十进制数，其表达形式为 KnMm，其中 K 是代表十进制数，n 表示该十进制数的位数，也表示位软元件的组数，M 表示位软件，m 表示位软元件的首地址。被组合位元件的首地址可以是任意的，但为了避免混乱，建议用 0 结尾的元件号(如 X0、X10、X20…)，则这些数据的表达形式为 KnX0、KnY0、KnM0、KnS0…。

例如，K2X0 表示由 X0 开始的 2 位十进制数(2 位 BCD 码)，由输入继电器 X000～X007 组成，其中 X007 为高位、X000 为低位；K4M0 表示 M0～M15 组成的 4 位十进制数，M15 为高位、M0 为低位。在进行 16 位数据处理时，位数为 K1～K4；32 位数据处理时，位数为 K1～K8，如 K8S0 表示由 S0～S31 组成的 8 位十进制数，但是，若在 32 位运算中采用数据 K4Y0，则将该数据的高 16 位看作 0，低 16 位为 K4Y0。

4. 变址寄存器 V、Z

变址寄存器的主要作用是“变址”，它用来保存变址数。该变址数与指令中给出地址部分的内容相加后产生有效地址，可用于修改操作对象的元件号。

操作数[S·]和[D·]中的点表示可为变址寻址方式，意指操作数的实际地址为指令给出的 S 或 D 的地址加上变址寄存器 V 或 Z 的内容。

在使用 16 位指令时，变址寄存器的使用示例如图 7-50 所示，最后一条指令实际上是将数据寄存器 D13 中的数据传送至数据寄存器 D22。从该图中也可看出，变址寄存器的操作方式与普通 16 位数据寄存器一样。

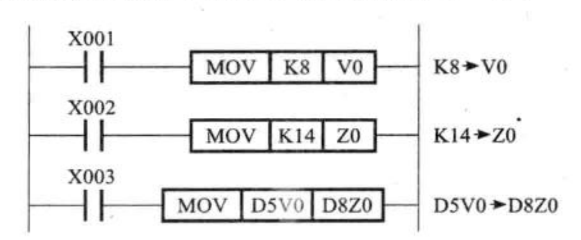


图 7-50 16 位指令时变址寻址方式梯形图示例

在使用 32 位指令时，指令中使用的变址寄存器也需要按 32 位指定。其方法是将 V(V0～V7)和 Z(Z0～Z7)对应编号组合使用，V 为高 16 位数据，Z 为低 16 位数据，而在指令中变址寄存器只需要指定 Z，即 Z 代表了 V 和 Z 组成的 32 位变址寄存器。32 位指令时变址寄存器的使用示例如图 7-51 所示，先将 K0 或 K10 传送至 V4Z4 中，然后在 X003 为 0→1 时，执行相应的数据传送。

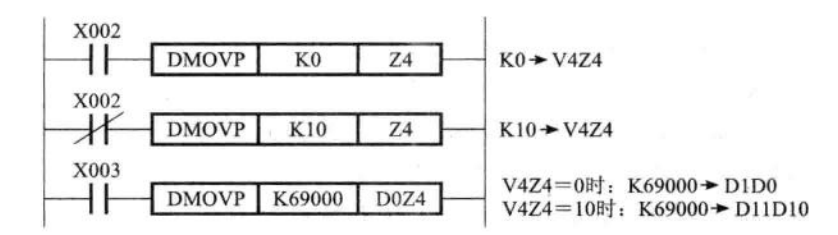


图 7-51 32 位指令时变址寻址方式梯形图示例

5. 常用特殊辅助继电器

在使用功能指令时，经常用到一些特殊辅助继电器作为指令执行结果的标志位：

M8020：零标志位，加减法运算结果为零时自动接通；

M8021：借位标志位，减法运算结果超过最大的负值时自动接通；



M8022:进位标志位,加法运算结果发生进位或移位结果发生溢出时自动接通;

M8029:指令执行结束标志位,当指令执行完毕时自动接通;

M8064:参数出错标志位,当指令参数出错时自动接通;

M8065:语法出错标志位,当指令语法出错时自动接通;

M8066:回路出错标志位,当指令回路出错时自动接通;

M8067:运算出错标志位,当指令运算出错时自动接通,当 PLC 从 STOP→RUN 时自动清除。

每次执行各种功能指令时,都可能会影响以上标志位的状态,使其置位为 1 或复位为 0。当不再执行功能指令时,已动作的标志不变化。

如果功能指令的参数、语法、回路、运算等方面出错,出错标志将被置位,同时在与 M 编号对应的文件寄存器 D8064～D8067 中自动存入出错码或步序号,消除错误后,出错标志自动复位。

7.8.2 看门狗定时器刷新指令 WDT

看门狗定时器刷新指令 WDT(Watch Dog Timer)的格式如图 7-52 所示,该指令功能编号为 FNC 07、无操作数。

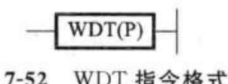


图 7-52 WDT 指令格式

看门狗定时器的定时时间为特殊数据寄存器 D8000 中的数(单位为 ms),当 PLC 一上电,就自动将 K200 装入 D8000 中,故看门狗的缺省定时为200 ms。在每个扫描周期中,当 PLC 的运算周期(从步 0 至 END 或 FEND 指令的执行时间)超过 200 ms 时,PLC 的出错指示灯点亮,PLC 立即停止执行用户程序,同时切断全部输出。

看门狗定时器的主要作用是防止因干扰等原因而使用户程序进入死循环。当执行 WDT 指令时,PLC 自动将 D8000 中的数据装入看门狗定时器,然后该定时器就自动重新开始计时。D8000 为 16 位数据寄存器,故最大定时为 32,767 ms。

当程序的运算周期超过 WDT 的设定值时,须在适当的程序步中加入 WDT 指令,以刷新看门狗定时器的定时时间,从而使程序能顺利执行。在 WDT 的缺省定时为200 ms时,其应用示例如图 7-53 所示。

通过改写 D8000 的内容,可以更改 WDT 的定时时间,如图 7-54 所示,在执行 WDT 指令后,新的定时时间立即生效。如果不编写 WDT 刷新指令,则在 END 指令处理时,D8000 的值才有效。

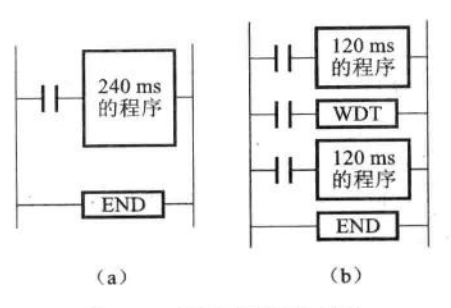



图 7-53 WDT 指令的使用

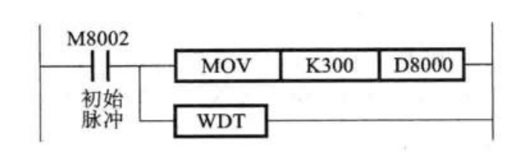


图 7-54 看门狗定时器定时时间修改

7.8.3 条件跳转指令 CJ

条件跳转指令 CJ(Conditional Jump)的格式如图7-55所示，其编号为 FNC 00、操作数为指针(标号)Pn。

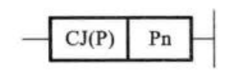
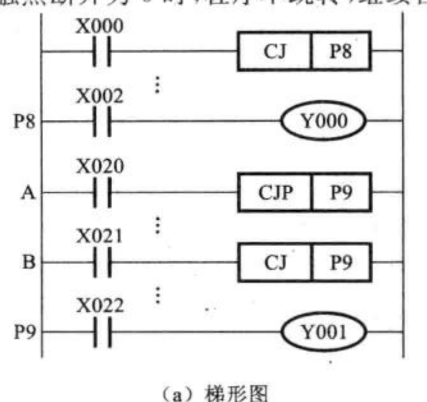


图 7-55 CJ 指令格式

各 FX 系列 PLC 的操作数 Pn 标号的取值范围有所不同，FX_{1S}系列 PLC 的标号为 P0～P63，FX_{1N}、FX_{2N}系列的为 P0～P127，FX_{3U}系列的为 P0～4095，FX_{3G}系列的为 P0～2047。这些标号中，P63 是 END 指令的缺省标号(不需标记)，程序中其他地方不能使用该标号。该指令占 3 个程序步。有 CJ(连续执行型)和 CJP(脉冲执行型)指令。

在顺序控制中，当某些条件满足时，需要跳过一段程序就采用条件跳转指令，以缩短运算周期。当该指令的输入信号为 1 时执行跳转；为 0 时不执行跳转，程序按顺序继续往下执行。

如图 7-56 所示，X000 常开触点闭合为 1 时，程序跳转到 P8 处执行；X000 常开触点断开为 0 时，程序不跳转，继续往下执行。



(a) 梯形图

步序	指令	器件
0	LD	X000
1	CJ	P8
4	…	…
	P8	
	LD	X002
	OUT	Y000
	LD	X020
	CJP	P9
	…	…
	LD	X021
	CJ	P9
	…	…
	P9	
	LD	X022
	OUT	Y001

(b) 指令表

图 7-56 CJ 条件跳转指令

在使用条件跳转指令时,需注意以下事项。

(1) 一个标号在左边母线处只能出现一次,若出现两次或两次以上,则出现错误。

(2) 对同一标号,可多处使用转移指令。如图 7-56 所示,若 X020 触点由 0→1,则程序跳转到 P9 处执行;若 X020 触点为非 0→1,则程序继续往下执行,执行到 B 处梯级时,若 X021 为 1,则跳转到 P9 处执行,否则程序不跳转,继续往下执行。

(3) 标号可以在跳转指令之前,使程序向上转移,如图 7-57 所示,但如果 X001 为 1 的时间超过看门狗定时器的定时时间 200 ms(缺省设置),则程序循环的时间会超过看门狗定时器的设定时间,使看门狗定时器出错,PLC 进入错误状态。

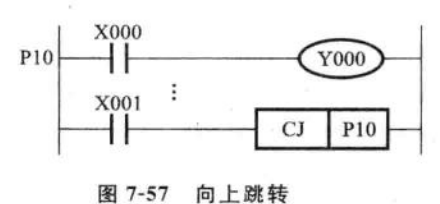


图 7-57 向上跳转

(4) 对元件状态的影响。

如图 7-58 所示,A 与 P5 跳转区间内的 Y、M 和 S,在跳转期间即使被驱动,Y、M 和 S 的状态仍保持为跳转前的状态。即 A 梯级的 X000 触点为 1 时,Y000、M1 和 S1 的状态不会随 X001、X002 和 X003 的变化而变化,因为这些梯级指令根本就不执行。

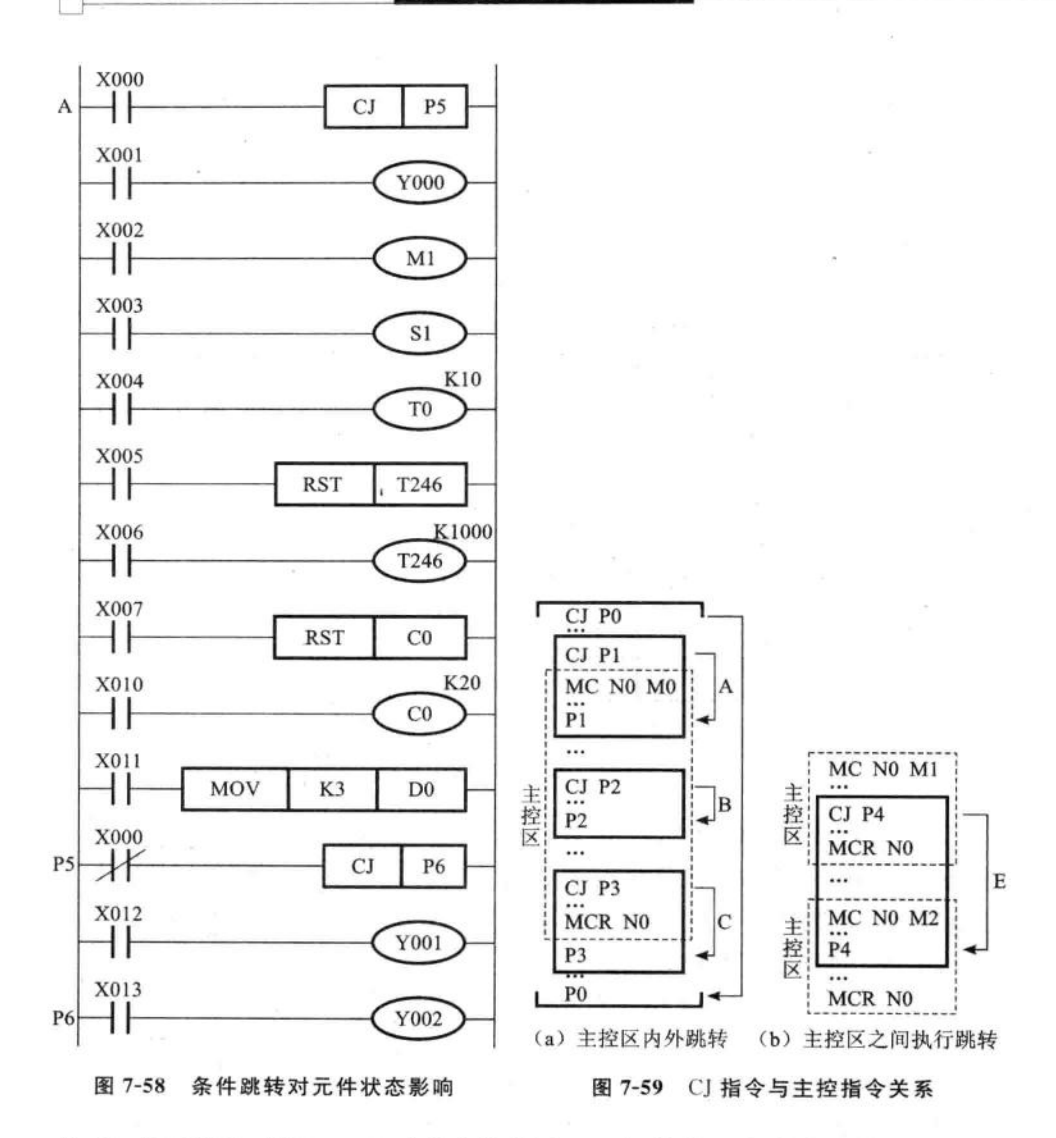
对计数器和定时器如 T0,在跳转前定时器线圈没有被驱动,在跳转后被驱动,则定时器不工作,即 X000=0,X004=0→X000=1,X004=1,T0 不计时;若在跳转前线圈被驱动,定时器工作,在跳转后它们将停止工作,待程序不跳转后继续工作,即 X000=0,X004=1→X000=1,X004=1,T0 停止工作,在 X000=0 后 T0 继续工作。但正在工作的子程序用的 T192～T199 及高速计数器不受跳转指令的影响仍继续工作。

如果累积定时器和计数器的 RST 复位指令(或梯级)在跳转区外,即使累积定时器和计数器的线圈输出指令(或梯级)被跳过,复位仍然有效。

在条件为互反的跳转程序段,允许同一编号的线圈出现两次(即双线圈)。在 A 处和 P5 处的跳转条件为互反,如 A 至 P5 程序段中有 Y001 线圈,P5 至 P6 程序中也有 Y001 线圈,这是允许的,因为 Y001 线圈只驱动一次。

(5) 与主控指令的关系。

如图7-59所示,从主控指令MC的外部向其内部跳转(见A),不管主控触



(a) 主控区内外跳转　(b) 主控区之间执行跳转

图 7-58　条件跳转对元件状态影响　　图 7-59　CJ 指令与主控指令关系

点 N0 是否接通，都把 P1 以下的主控触点 M0 视作接通来执行主控区内的程序。

若跳转区在主控区内(见 B)，则主控触点 N0 没有接通时不执行跳转指令。

从主控区内向外跳转(见 C)，主控触点 N0 没有接通时不执行跳转指令；在主控触点 M0 接通时执行跳转指令，但不执行 MCR 指令。

从一个主控区向另一个主控区跳转时(见 E)，若主控触点 M1 接通，则执行跳转指令，跳转后将 M2 主控触点视作接通来执行程序，并且不执行 MCR N0。

7.8.4 主程序结束指令 FEND

主程序结束指令 FEND(First End)的格式如图7-60所示，该指令编号为 FNC 06、无操作数、为连续执行型指令。



图 7-60 FEND 指令格式

FEND 指令与 END 指令的功能一样，当 PLC 执行该指令后，执行输出刷新、输入采样、看门狗定时器刷新，然后返回到 0 步运行程序。在编写子程序和中断子程序时，需要在主程序中使用该指令。

如果多次使用 FEND 指令，须在最后的 FEND 与 END 之间编写子程序或中断子程序。

7.8.5 子程序调用与返回指令 CALL、SRET

子程序调用指令 CALL(Subroutine Call)和返回指令 SRET(Subroutine Return)的格式如图 7-61 所示。

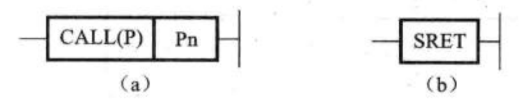


图 7-61 CALL 和 SRET 指令格式

CALL 指令的编号为 FNC 01，其操作数 Pn 指针的取值与 FX 系列有关，具体取值范围与条件跳转指令 CJ 的标号取值范围相同，P63 也不能用于 CALL 指令。

SRET 指令的编号为 FNC 02，无操作数。

编写子程序时，子程序的标号应出现在主程序结束指令 FEND 之后，子程序必须以 SRET 结束。

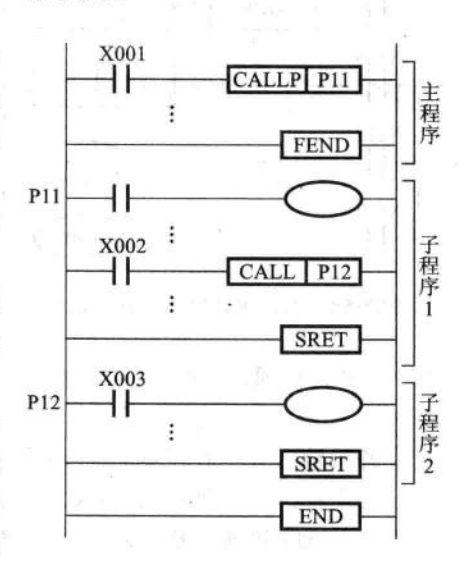


图 7-62 子程序及其嵌套

如图 7-62 所示，当 X001 触点从 0→1(OFF→ON)时，CALLP P11 指令使 PLC 执行一次 P11 子程序，在 P11 子程序执行 SRET 指令后，程序返回到 CALLP P11 指令的下一条指令处执行；当 X001 为非 0

→1 状态时，不调用子程序，程序继续往下执行。

在子程序中可以多次使用 CALL 指令，以形成子程序嵌套。子程序内的 CALL 指令最多允许使用 4 次，即最多允许 5 层嵌套。图 7-62 所示的子程序嵌套共有 2 层。

若要在子程序中使用定时器，可使用 T192～T199 定时器（FX 系列 PLC 手册中的规定），具体用法可查阅手册。

另外要注意的一点是：子程序标号不能与跳转指令的标号重复。

7.8.6 中断指令 EI、DI、IRET

允许中断指令 EI(Enable Interrupts)、禁止中断指令 DI(Disenable Interrupts)、中断返回指令 IRET(Interrupt Return)的格式如图 7-63 所示。

EI 指令的编号为 FNC 04，DI 指令的编号为 FNC 05，IRET 指令的功能编号为 FNC 03。这 3 条指令均无操作数，也都不需驱动触点，都为连续执行型指令。

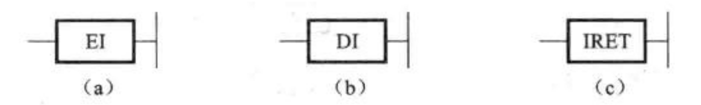


图 7-63　中断指令 EI、DI、IRET 格式

由于 PLC 的工作方式为工作周期制，如果一些特殊输入等信号需要及时处理，则须使用中断指令。在 PLC 执行顺控主程序的过程中，若有中断源请求中断，则暂停主程序的执行，转去执行中断子程序，处理该中断所需完成的事务，当中断子程序执行完后，再返回原来主程序的中断点继续执行主程序。

FX 系列 PLC 有 3 类中断源，分别为输入中断、定时器中断以及高速计数器中断。

中断子程序的编写方法如图 7-64 所示，在主程序执行到 EI 指令与 DI 指令区间时，如果有中断源请求中断，如 X000 端的输入信号为上升沿，则暂停处理当前主程序，转去执行 I001 指针所指的中断子程序，执行该子程序的 IRET 指令后，返回原中断点继续执行主程序。

1. 输入中断

输入中断源有 6 个，如表 7-9 所示。输入中断源可以从输入端 X000～X005 接入，可以指定为上升沿或下降沿有效，但不能同时有效，如对于 X000 端的中断请求信号，程序中不能同时有 I001 和 I000 中断指针编号。各输入中断源可由 M8050～M8055 中相应的特殊辅助继电器置 1 来屏蔽，即该辅助继电器为 1 时，禁止相应输入端的中断请求，为 0 则允许。当 PLC 从 RUN→STOP 时，

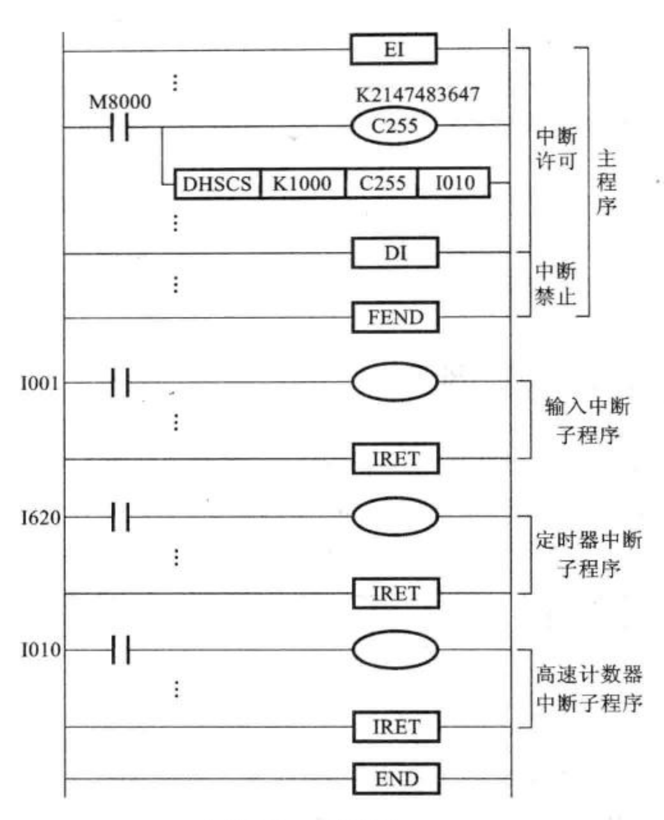


图 7-64　中断指令

M8050～M8055 自动复位为 0。

表 7-9　输入中断源

输入端	中断指针编号		输入中断禁止
	上升沿中断	下降沿中断	
X000	I001	I000	M8050
X001	I101	I100	M8051
X002	I201	I200	M8052
X003	I301	I300	M8053
X004	I401	I400	M8054
X005	I501	I500	M8055

FX 各系列 PLC 对输入中断信号脉宽的要求略有不同，基本上为几微秒至几十微秒。

2. 定时器中断

定时器中断源有3个，如表7-10所示。如图7-64所示，定时器中断指针编号为I620，则在主程序的中断许可区间，PLC每隔20 ms，就执行一次编号I620所指的中断子程序。

表7-10 定时器中断源

中断指针编号	定时时间(ms)	中断禁止
I6□□	□□为10～99的整数	M8056
I7□□		M8057
I8□□		M8058

同样，当程序中对M8056～M8058置1时，则禁止相应中断编号的定时器中断。当PLC从RUN→STOP时，M8056～M8058自动复位为0。

3. 高速计数器中断

高速计数器中断源有6个，如表7-11所示，若程序中驱动特殊辅助继电器M8059为1，则禁止所有的高速计数器中断。高速计数器编号为C235～C255，但使用数量最多为其中的6点。

表7-11 高速计数器中断源

中断指针编号	中断禁止
I010、I020、I030、I040、I050、I060	M8059

高速计数器中断须与高速计数器的比较置位指令DHSCS一起使用，当高速计数器的当前值达到DHSCS指令的规定值时，就执行该指令指定编号的中断子程序。

如图7-64，由RUN监视特殊辅助继电器M8000驱动C255，当C255的当前值由999→1000时，执行I010所指的中断子程序。

4. 注意事项

(1) 中断指针编号I×××须位于主程序结束指令FEND之后。

(2) 在DI指令后产生的中断请求，须在执行了EI指令后才能响应。

(3) 共有15个中断指针，故可以设置15个中断子程序。

(4) 中断优先级。当多个中断请求不同时产生时，按产生的先后顺序进行中断；当多个中断请求同时产生时，指针编号小的中断优先执行。

(5) 某些FX系列的PLC可实现二级中断嵌套。一般情况下，在执行中断子程序过程中，自动禁止其他中断；若在中断子程序中，使用EI和DI指令，则在执行该中断子程序EI与DI区间的指令时，可接受其他中断。



7.8.7 循环指令 FOR、NEXT

循环开始指令 FOR 和循环结束指令 NEXT 的格式如图 7-65 所示。

FOR 指令的编号为 FNC 08，操作数[S·]可为 K、H、KnX、KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z。NEXT 指令的编号为 FNC 09，无操作数。FOR 和 NEXT 均为连续执行型指令，NEXT 指令不需驱动触点。

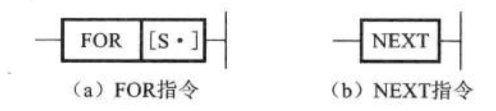


图 7-65 FOR 和 NEXT 指令格式

在 FOR 与 NEXT 之间的程序执行 n 次(由 FOR 的操作数指定)后，再执行 NEXT 后面的程序。循环次数 n 的取值范围为 1～32,767，若指定为－32768～0，则作 $n=1$ 处理。循环指令的应用示例如图 7-66 所示，该示例为 3 重循环，当不需要执行循环体时，可使用 CJ 指令跳过。

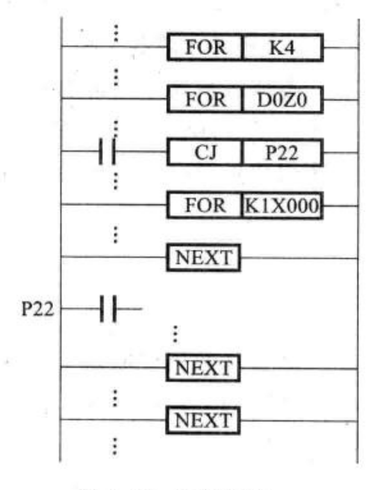


图 7-66 循环指令

在使用循环指令时，需要注意以下事项。

(1) FOR 和 NEXT 指令必须成对使用，FOR 在前，NEXT 在后，不可倒置，否则出错。

(2) 循环指令最多可以嵌套 5 层。

(3) 当 FOR 指令出现在 FEND 或 END 指令之前时，NEXT 指令不能出现在 FEND 或 END 指令之后，否则出错。

(4) 当循环次数较大时，执行循环体的时间有可能超过看门狗定时器的定时时间，从而引起看门狗定时器报错，这种情况下，需要更改看门狗定时器的时间，或在循环体中使用看门狗定时器刷新指令 WDT。

7.8.8 传送指令 MOV

MOV 指令的格式如图 7-67 所示。

MOV(Move)传送指令的功能编号为 FNC 12，16 位运算占 5 个程序步，32 位运算占 9 个程序步。它将源操作数[S·]传送给目的操作数[D·]。[S·]可

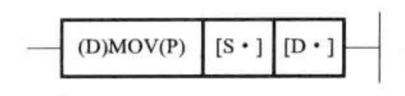
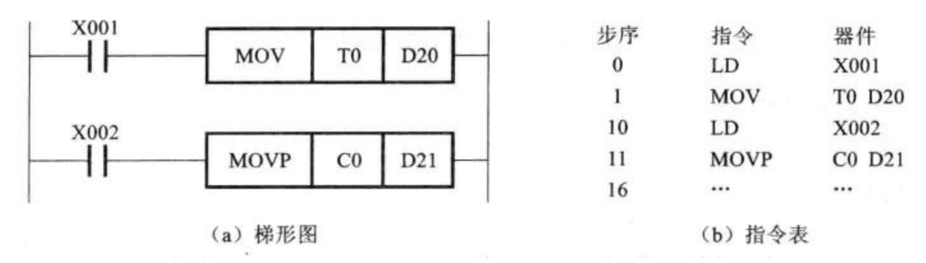


图 7-67 MOV 指令格式

为 K、H、KnX、KnY、KnM、KnS、T、C、D、V 和 Z，[D·]可为 KnY、KnM、KnS、T、C、D、V 和 Z。

1. 定时器和计数器当前值的读出

如图 7-68 所示，若 X001 为 1，则在 PLC 的每个工作周期，都将 T0 的当前值传送给 D20，当前值不受影响；在 X002 从 0→1 时，C0 的当前值传送给 D21，当前值也不受影响。



步序	指令	器件
0	LD	X001
1	MOV	T0 D20
10	LD	X002
11	MOVP	C0 D21
16	…	…

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-68 用 MOV 指令读出定时器和计数器当前值

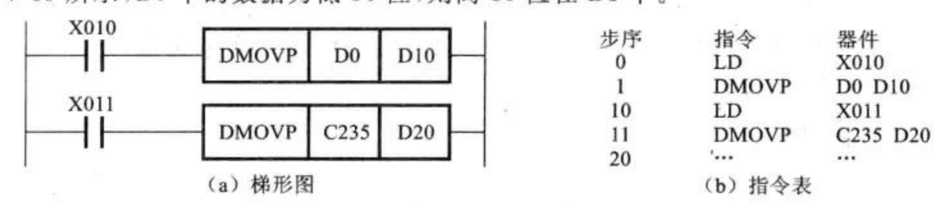
2. 定时器和计数器设定值的间接指定

请参考定时器和计数器的相关章节。

3. 32 位数据的传送

32 位数据的传送要用 DMOV 指令。如图 7-69 所示，在 X010 从 0→1 时，(D1D0)→(D11D10)，即 D1 的内容传送给 D11，D0 的内容传送给 D10。同样，在 X011 从 0→1 时，C235 的当前值→(D21D20)，此为读出 32 位计数器当前值的方法。

32 位传送中，指令中给出低 16 位的地址，高 16 位地址为该地址＋1。如图 7-69 所示，D0 中的数据为低 16 位，则高 16 位在 D1 中。



步序	指令	器件
0	LD	X010
1	DMOVP	D0 D10
10	LD	X011
11	DMOVP	C235 D20
20	…	…

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-69 32 位数据传送

7.8.9 比较指令 CMP

比较指令 CMP(Compare)的格式如图 7-70 所示。操作数[S1・]和[S2・]可为 K、H、KnX、KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z,[D・]可为 Y、M、S。

该指令是将源操作数[S1・]与[S2・]中的数进行比较,根据比较结果(小于、相等、大于),使[D・]、([D・]+1)、([D・]+2)其中一个为 1(ON)。目标操作数由三个元件组成,指令中[D・]给出首地址,其他两个为编号后续递增的相邻元件。

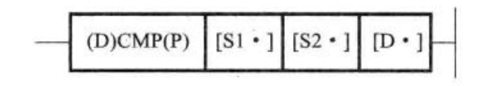
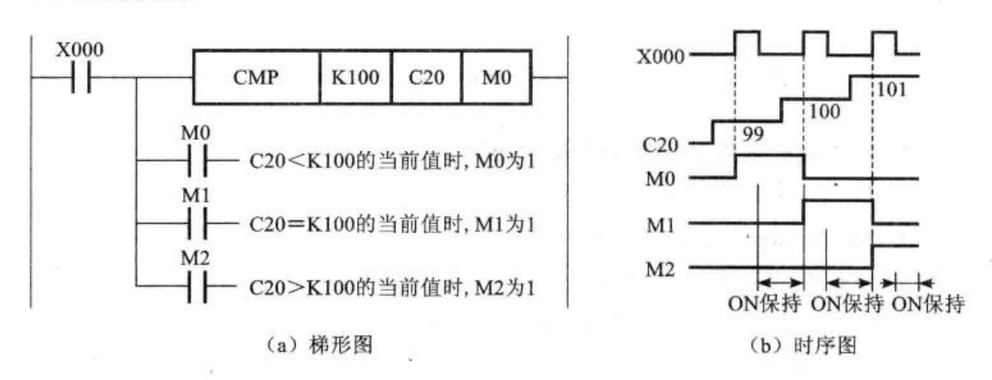


图 7-70 CMP 指令格式

1. 16 位比较

16 位比较示例如图 7-71 所示。当 X000 为 1 时,执行比较指令,结果如图 7-71(b)所示。



(a) 梯形图　　(b) 时序图

图 7-71 16 位数据比较

2. 32 位比较

对于 32 位操作数的比较指令 DCMP,[S1・]操作数为([S1・]+1,[S1・]),[S2・]操作数为([S2・]+1,[S2・]),目标操作数仍包括[D・]、([D・]+1)、([D・]+2)三个元件。

3. 注意事项

(1) 当不执行比较指令时,目标操作数中的比较结果保持不执行 CMP 指令前的状态。如图 7-71 所示,当 X000 由 1→0 时,不执行 CMP 指令,M0～M2

保持 X000 断开前的状态。

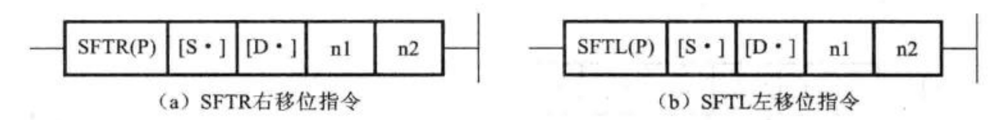
(2) 如要在不执行 CMP 指令时清除比较结果,如图 7-71 中若要清除 M0~M2,则需对 M0~M2 使用 RST 或 ZRST 指令。

(3) CMP 指令是按代数形式进行大小比较,如 −10<2;所有源操作数均按二进制数处理。

(4) 若指令中操作数不全、元件超出范围、软元件地址不对,则程序出错。

7.8.10 位移位指令 SFTR、SFTL

位移位指令的格式如图 7-72 所示。位移位指令有右移位 SFTR(Shift Right)和左移位 SFTL(Shift Left)指令,SFTR 和 SFTL 的功能指令编号分别为 FNC 34 和 FNC 35。它们的源操作数[S·]可为 X、Y、M 和 S,目的操作数[D·]可为 Y、M 和 S。它们是 16 位运算,占 9 个程序步。



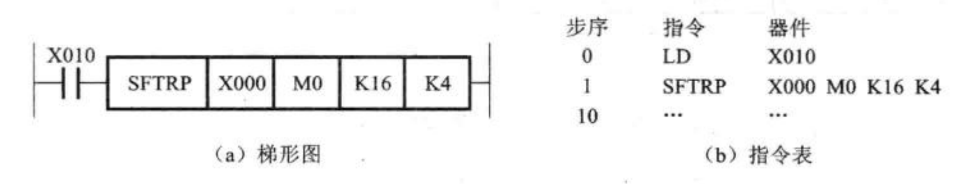
(a) SFTR右移位指令　(b) SFTL左移位指令

图 7-72　SFTR、SFTL 指令格式

位移位指令使位元件中的状态(0 或 1)成组地向右或向左移动。n1 为目的操作数的位数,n2 表示目的操作数要右移或左移 n2 位,源操作数为右移或左移后要填入的数,它也是 n2 位。

1. 右移位指令 SFTR

右移位指令的应用示例如图 7-73 所示。



步序	指令	器件
0	LD	X010
1	SFTRP	X000 M0 K16 K4
10	…	…

(a) 梯形图　(b) 指令表

图 7-73　SFTR 右移位指令示例

在上述右移指令中,目的操作数是以 M0 为起点、编号连续递增的 16 个内部继电器 M0~M15(共 16 位),需右移 4 位。源操作数也有 4 位,它是以 X000 为起点、编号连续递增的 4 个输入继电器 X000~X003(共 4 位)。

在 X010 从 0→1 时,执行一次右移,且右移 4 位,执行过程如图 7-74 所示。

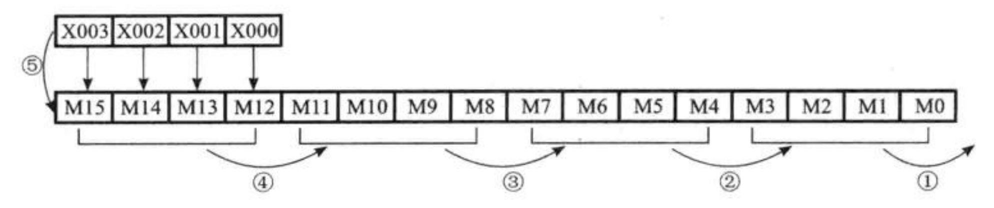


图 7-74　SFTR 右移位指令执行过程

第①步，M3～M0 的内容右移丢失；第②步，M7～M4 的内容右移入 M3～M0；第③步，M11～M8 的内容右移入 M7～M4；第④步，M15～M12 的内容右移入 M11～M8；第⑤步，X003～X000 的内容移入 M15～M12。若只需右移一位，则 n2 为 K1，源操作数也只有 X000(1 位)。

2. 左移位指令 SFTL

左移位指令的应用示例如图 7-75 所示。

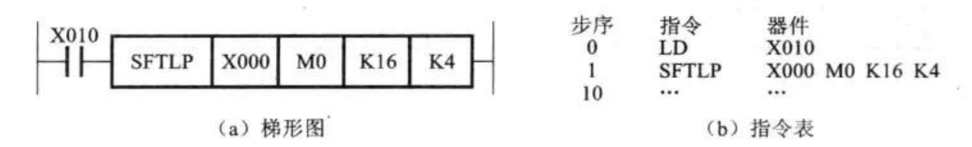


图 7-75　SFTL 左移位指令示例

在 X010 从 0→1 时，执行一次左移且左移 4 位，执行过程如图 7-76 所示。

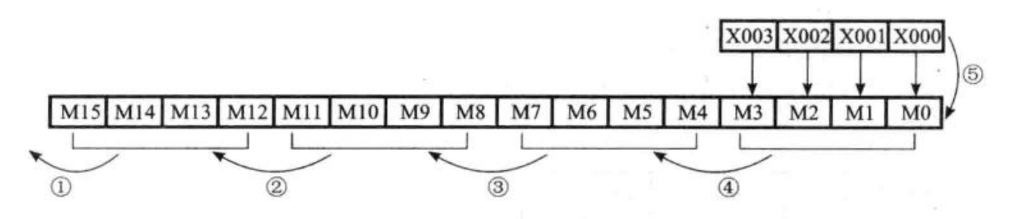


图 7-76　SFTL 左移位指令执行过程

第①步，M15～M12 的内容左移丢失；第②步，M11～M8 的内容左移入 M15～M12；第③步，M7～M4 的内容左移入 M11～M8；第④步，M3～M0 的内容左移入 M7～M4；第⑤步，X003～X000 的内容移入 M3～M0。若只需左移一位，则 n2 为 K1，源操作数也只有 X000(1 位)。

7.8.11　区间复位指令 ZRST

区间复位指令 ZRST(Zone Reset)的格式如图 7-77 所示。

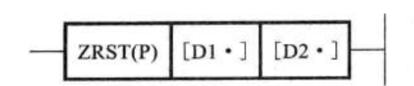


图 7-77 ZRST 指令格式

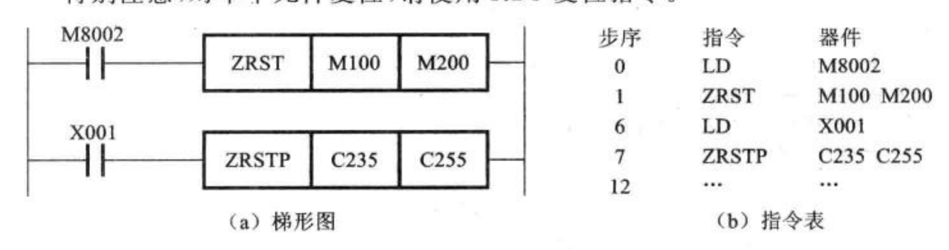
区间复位指令将[D1·]与[D2·]指定元件号范围内的同类元件成批复位，其功能指令编号为 FNC 40，目标元件可为 Y、M 和 S(位元件)以及 T、C 和 D(字元件)。执行该指令需 5 个程序步。

[D1·]和[D2·]应指定为同一类元件，且[D1·]的编号应小于[D2·]的编号。当[D1·]的编号大于[D2·]的编号时，只复位[D1·]指定的元件。

[D1·]和[D2·]可同时指定为 32 位。但不能一个指定为 16 位，另一个指定为 32 位。

ZRST 指令应用示例如图 7-78 所示。由于 M8002 只在 PLC 运行程序后的第一个工作周期输出为 1 的初始化脉冲，故成批复位 M100～M200(位元件)只有一次；在 X001 从 0→1 时(上升沿)，成批复位 C235～C255(字元件)，即这些计数器的当前值清零以及输出触点复位。

特别注意，对单个元件复位，请使用 RST 复位指令。



步序	指令	器件
0	LD	M8002
1	ZRST	M100 M200
6	LD	X001
7	ZRSTP	C235 C255
12	…	…

(b) 指令表

图 7-78 ZRST 区间复位指令示例

7.8.12 输入、输出刷新指令 REF

输入、输出刷新指令 REF(Refresh)的格式如图 7-79 所示。操作数[D]可为 X、Y，n 可为 K、H。

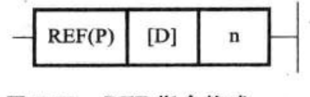


图 7-79 REF 指令格式

PLC 采用周期工作模式，在程序执行阶段，不会进行输入采样和输出刷新。在执行程序时，若想获得输入端子的最新输入(X)信息或将输出(Y)立即从输



出端子输出，可使用 REF 刷新指令，以实现将最新输入 X 即时存入内存或将内存中的 Y 即时输出。刷新指令有输入刷新和输出刷新两种，其应用示例如图 7-80 所示。

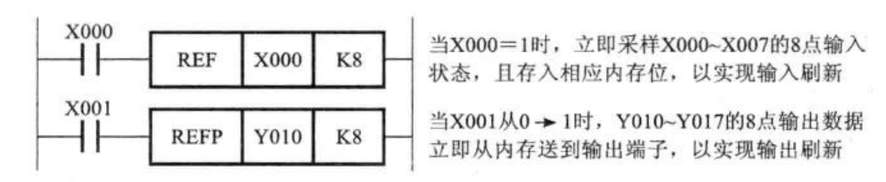


图 7-80　REF 刷新指令应用示例

（1）[D]表示被立即刷新的 X 或 Y 的首地址，该首地址必须是以 8 点为单位的首地址，如 X000、X010、X020、Y000、Y010、Y020 等。

（2）n 是立即刷新的 X 或 Y 的点数，必须是 8 的整数倍。

7.8.13　二进制加减运算指令 ADD、SUB

二进制加法运算指令 ADD(Addition)、减法运算指令 SUB(Subtraction)的格式如图 7-81 所示。操作数[S1 ·]和[S2 ·]可为 K、H、KnX、KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z，[D ·]可为 KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z。

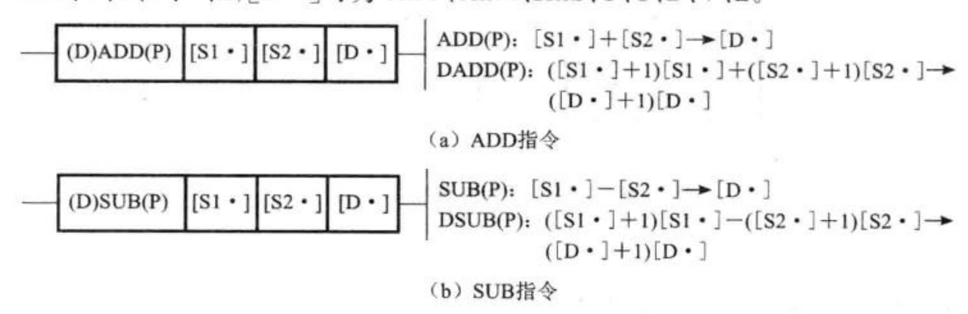


图 7-81　ADD、SUB 指令格式

ADD、SUB 指令的应用示例如图 7-82 所示。

（1）上述指令用于进行代数加、减运算，如 5+(−8)=−3；每个操作数的最高位为符号位，最高位为 0 是正数，为 1 则是负数。

（2）16 位运算时，操作数的数据范围为−32,768～+32,767；32 位运算时，数据范围为−2,147,483,648～+2,147,483,647。

（3）运算结果为 0 时，零标志置位(M8020=1)；运算结果大于+32,767(或+2,147,483,647)时，进位标志置位(M8022=1)；运算结果小于−32,768(或

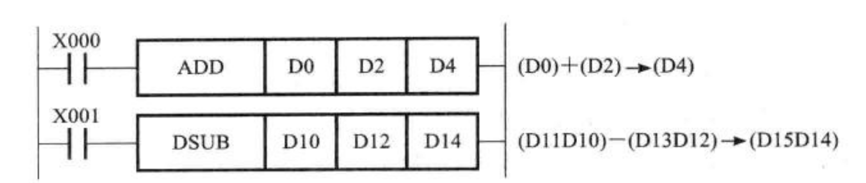


图 7-82 ADD、SUB 指令应用示例

−2,147,483,648)时，借位标志置位(M8021=1)。

(4) 当源操作数为常数时，会自动转换为二进制数。

7.8.14 二进制乘除运算指令 MUL、DIV

二进制乘法运算指令 MUL(Multiplication)、二进制除法运算指令 DIV(Division)的格式如图 7-83 所示。操作数[S1·]和[S2·]可为 K、H、KnX、KnY、KnM、KnS、T、C、D、Z，[D·]可为 KnY、KnM、KnS、T、C、D、Z(16 位时)。

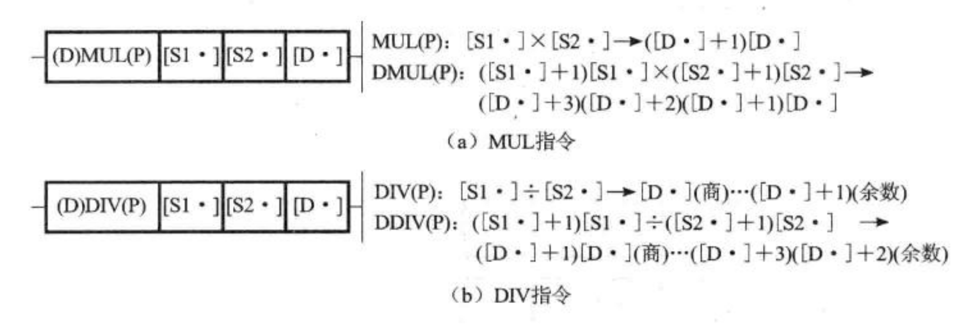


图 7-83 MUL、DIV 指令格式

MUL、DIV 指令的应用示例如图 7-84 所示。

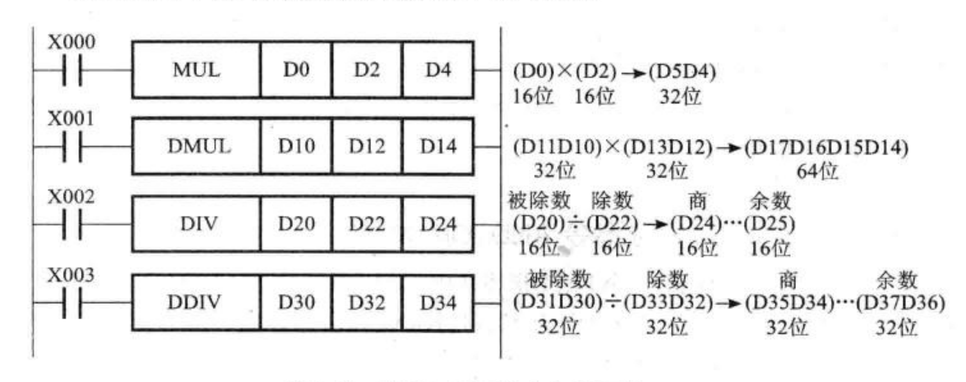


图 7-84 MUL、DIV 指令应用示例

（1）上述指令用于进行代数乘、除运算，且数据的最高位为符号位。

（2）当源操作数为常数时，会自动转换为二进制数。

（3）除数为 0 时，发生运算错误，不能执行指令。当被除数或除数有一个为负数时，商为负数；当被除数为负数时，余数也为负数。

7.8.15　二进制加 1、减 1 指令 INC、DEC

二进制加 1 指令 INC（Increment）、减 1 指令 DEC（Decrement）的格式如图 7-85 所示。操作数[D·]可为 KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z。

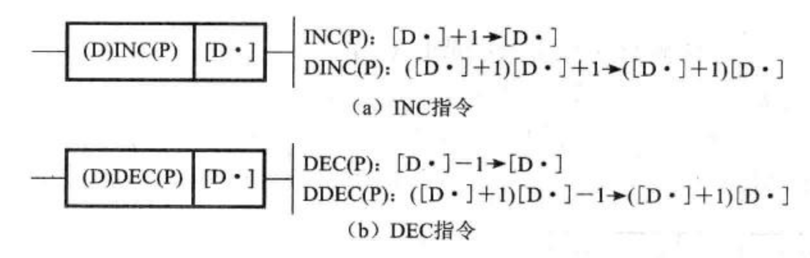


图 7-85　INC、DEC 指令格式

INC、DEC 指令的应用示例如图 7-86 所示。

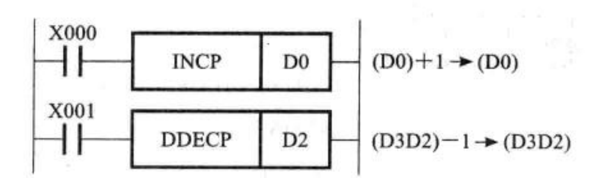


图 7-86　INC、DEC 指令应用示例

如果从+32,767（或+2,147,483,647）再加 1，则变成−32,768（或−2,147,483,648）；如果从−32,768（或−2,147,483,648）再减 1，则变成+32,767（或+2,147,483,647）。在以上变化时，标志位不动作，即这两条指令与零标志、进位标志、借位标志无关。

7.8.16　逻辑与、或、异或指令 AND、OR、XOR

二进制数逻辑与指令 AND、或指令 OR、异或指令 XOR 的格式如图 7-87 所示。操作数[S1·]和[S2·]可为 K、H、KnX、KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z，[D·]可为 KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z。

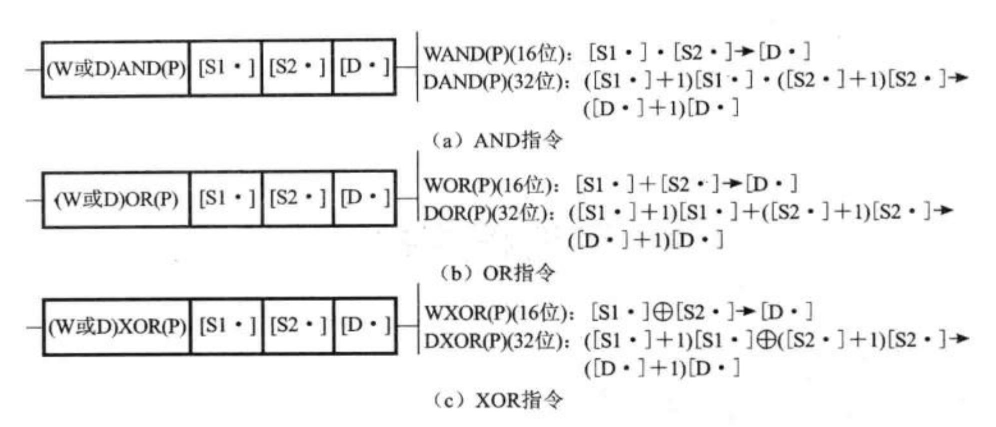


图 7-87　AND、OR、XOR 指令格式

AND、OR、XOR 指令的应用示例如图 7-88 所示。

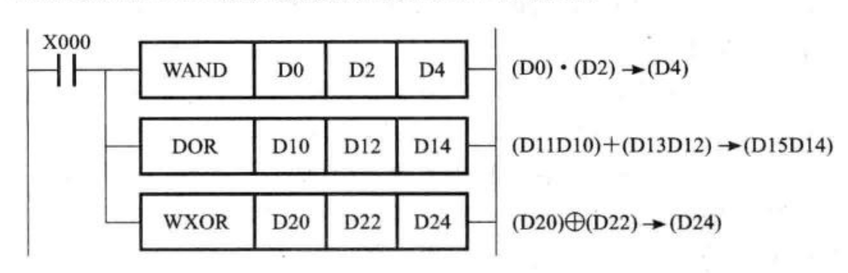


图 7-88　AND、OR、XOR 指令应用示例

(1) 上述指令用于各数据的二进制数对应位进行与、或、异或运算。在运算时，源操作数不会发生变化。

(2) 当源操作数为常数时，会自动转换为二进制数。

7.8.17　求补指令 NEG

二进制数求补指令 NEG(Negation)的格式及运算过程如图 7-89 所示。操作数[D·]可为 KnY、KnM、KnS、T、C、D、V、Z。

(D)NEG(P) [D·]

NEG(P)：$\overline{[D\cdot]}+1\rightarrow[D\cdot]$

DNEG(P)：$\overline{([D\cdot]+1)[D\cdot]}+1\rightarrow([D\cdot]+1)[D\cdot]$

图 7-89　NEG 指令格式及运算过程

NEG 指令是把目标操作数中的二进制数各位(包括最高符号位)取反，然

后整个数加1,最后将结果送入目标操作数中。FX系列PLC中的负数均以二进制数的补码形式表示,负数的绝对值可以通过求补指令求得。

7.9 可编程控制器的编程

7.9.1 编程的基本规则

(1) PLC中所有继电器(输入/输出继电器、辅助继电器、状态S、计时器、计数器、特殊功能继电器等)的数目都是有限的,但是,当继电器作为触点用的时候,它们的数目是没有限制的,即同一编号继电器的触点(常开或常闭)可以在同一程序里多次使用。

(2) 在一段顺序控制程序中,同一编号继电器不可以在同一程序里出现在两句或多句OUT指令的数据区里。也就是说,同一编号的继电器线圈不可以使用两次及两次以上,因为前面的输出无效,只有最后一次输出才是有效的,这就是所谓的双线圈问题。但在使用条件跳转或步进梯形图指令的情况下,则可以使用双线圈,因为对该线圈的驱动只有一次。

如图7-90(a)所示,第一个线圈Y000实际上是无效的。如果题意是在满足A·B+(C+D)·E=1的条件下,Y000有输出,则可将图7-90(a)改为图7-90(b)或图7-90(c)。

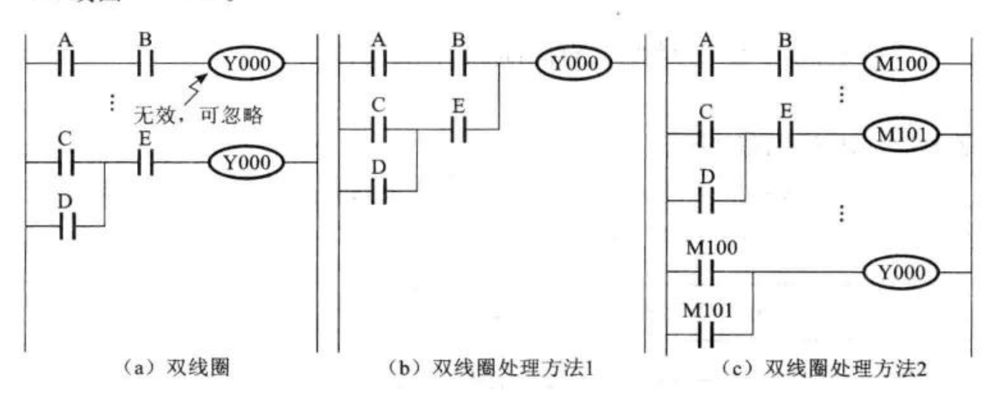


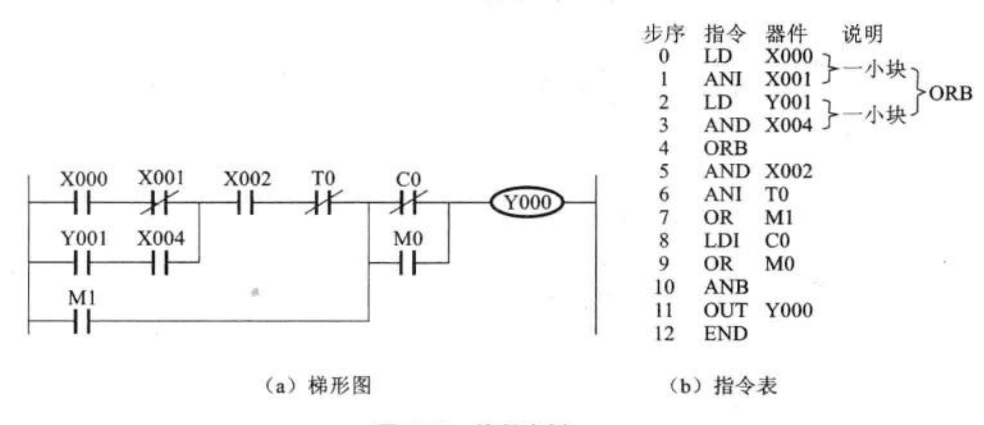
图7-90 双线圈处理

(3) 画梯形图时，在二条垂直母线之间，按 PLC 规定的图形符号、编号，按控制的逻辑与顺序，从上往下、从左往右依次画出各个梯级。即每个梯级都是从左边母线开始，继电器的线圈一律画在图的右侧与右边母线相连。

(4) 编程应按从上往下梯级的顺序，一个梯级一个梯级地编写，对计时器和计数器，需设定时间常数和计数常数。整个程序的结尾必须由 END 指令完结。

7.9.2 编程方法

PLC 程序的编写必须遵守上述的基本规则，对于较复杂的梯形图，可先将梯形图分成若干小块，每一块的编程从最左边触点开始，即用 LD(或 LDI)开始，而里面由 AND(ANI)、OR(ORI)等指令所组成，每一小块之间则用 ANB 或 ORB 指令连接，最后由 OUT 指令结束这个梯级的编程。实例如图 7-91 所示。



步序	指令	器件	说明
0	LD	X000	一小块 } ORB
1	ANI	X001	
2	LD	Y001	一小块
3	AND	X004	
4	ORB		
5	AND	X002	
6	ANI	T0	
7	OR	M1	
8	LDI	C0	
9	OR	M0	
10	ANB		
11	OUT	Y000	
12	END		

(a) 梯形图　　(b) 指令表

图 7-91 编程实例

7.9.3 编程技巧

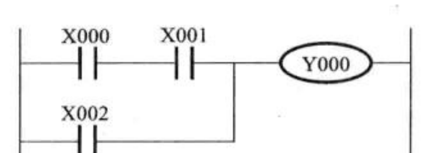
(1) 如图 7-92 所示的并联电路，对仅有一个触点并联的支路，将其排在下方，可减少指令条数。

(2) 如图 7-93 所示的串联电路，串联的并联电路安排在左边，可减少指令条数。

(3) 重新安排不能编程的梯级。

如图 7-94(a)所示的桥式梯级，需转换为图 7-94(b)才能编程。

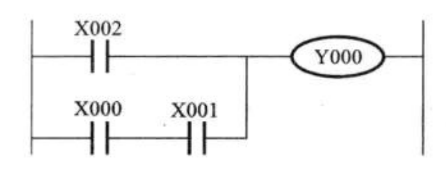
如图 7-95(a)所示线圈 C 的连接位置，线圈的右侧要直接连接母线，不能连接触点，并且一般将只有一个线圈的分支放在最上面。



(a) 好的梯形图

LD	X000
AND	X001
OR	X002
OUT	Y000

(b) 图 (a) 的指令表

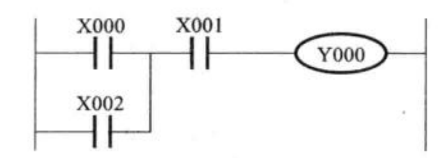


(c) 不好的梯形图

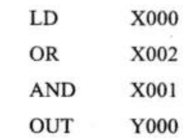
LD	X002
LD	X000
AND	X001
ORB	
OUT	Y000

(d) 图 (c) 的指令表

图 7-92　并联电路

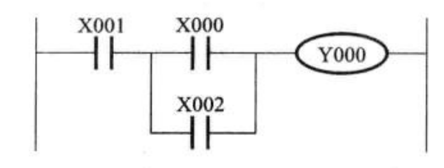


(a) 好的梯形图



LD	X000
OR	X002
AND	X001
OUT	Y000

(b) 图 (a) 的指令表

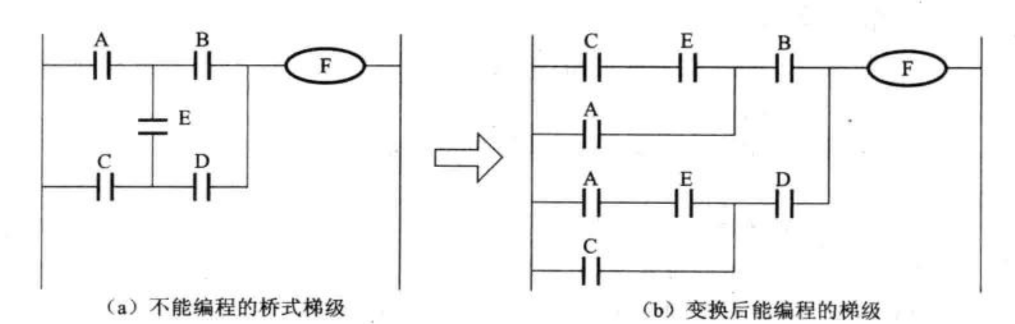


(c) 不好的梯形图

LD	X001
LD	X000
OR	X002
ANB	
OUT	Y000

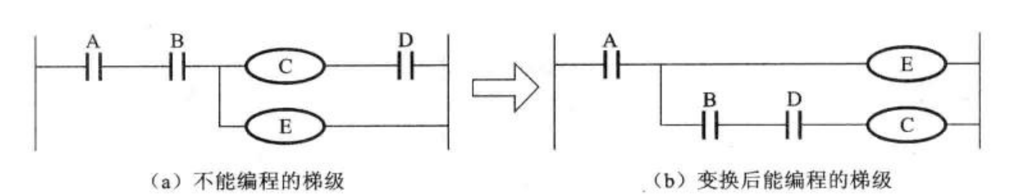
(d) 图 (c) 的指令表

图 7-93　串联电路



(a) 不能编程的桥式梯级　　(b) 变换后能编程的梯级

图 7-94　桥式梯级

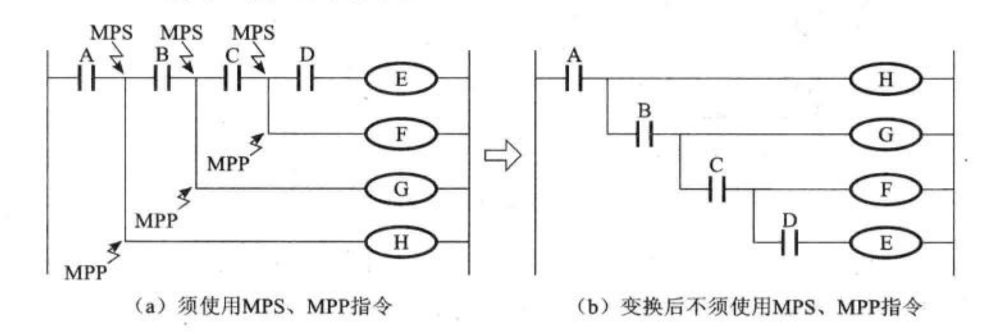


(a) 不能编程的梯级　　(b) 变换后能编程的梯级

图 7-95　不能编程的电路

(4) 梯形图的处理。

如图 7-96(a),需使用多个 MPS、MPP 指令,改为图 7-96(b)后,不需使用 MPS、MPP 指令,编程也很方便。



(a) 须使用MPS、MPP指令　　(b) 变换后不须使用MPS、MPP指令

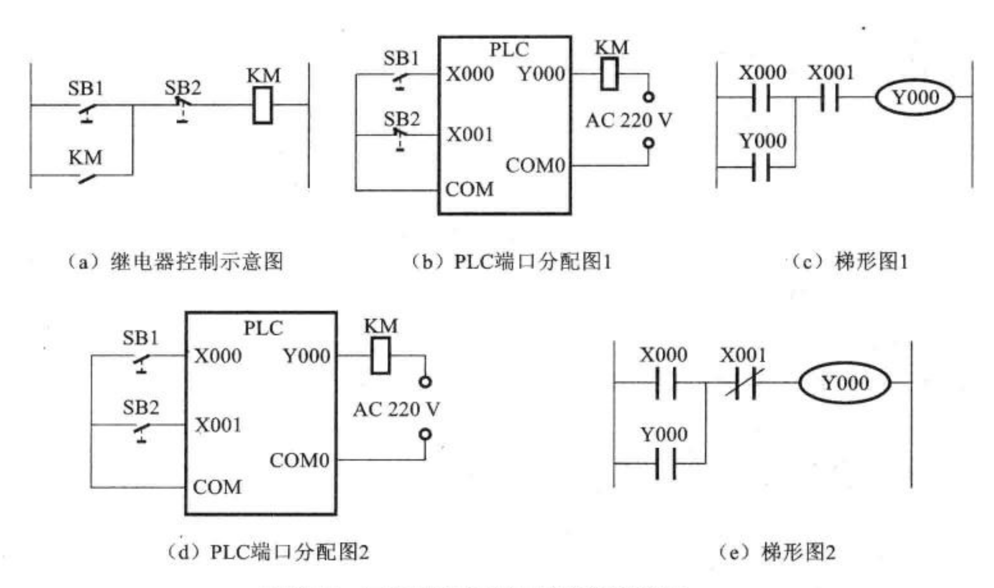
图 7-96　梯形图处理

(5) 常闭触点输入的处理。

PLC 的应用分两种情况,或是用于新设计的机电一体化生产机械的控制系统,或是用于对老设备的改造,即用 PLC 取代原继电器控制柜。对于后者,已有成熟的继电器电气控制原理图,可以将继电器控制原理图转变为相应的梯形图,转变过程中要注意常闭触点作为输入信号时的处理。

下面以三相异步电动机起动、停止的控制电路为例,如图 7-97 所示,讲述改用 PLC 控制时对停止按钮的处理方法。图 7-97(a)为其继电接触器控制的原理示意图,SB1 为起动按钮(用常开触点),SB2 为停止按钮(用常闭触点),KM 为控制电动机的交流接触器。

若将上述控制改为 PLC 控制,分别将 SB1、SB2 接入 PLC 输入端 X000、X001,KM 接至输出端 Y000,其接线如图 7-97(b)所示。直接将继电器控制原理图转变为梯形图,如图 7-97(e)所示。按图 7-97(e)编程,并运行程序,结果发现 SB1 按钮按下,输出继电器 Y000 不为 1(ON),因而电动机不能起动。其原因是 SB2 仍按常闭触点接入 PLC 的输入端,在不按停止按钮的情况下,X001



（a）继电器控制示意图　（b）PLC端口分配图1　（c）梯形图1

（d）PLC端口分配图2　（e）梯形图2

图 7-97　三相异步电动机 PLC 起停控制

输入继电器的状态始终为 1，图 7-97(e)中 X001 常闭触点断开，Y000 线圈的状态为 0，故接触器 KM 线圈不得电，电动机不能起动。解决方法是将梯形图中所串 X001 触点改为常开触点，如图 7-97(c)所示，即继电器控制原理图中停止按钮的常闭触点在梯形图中要用常开触点表示。

另一更好的办法是将停止按钮 SB2 用常开触点接入 PLC，见图 7-97(d)，此时则仍用图 7-97(e)所示的梯形图。通常为了使梯形图与继电器控制原理图对应，在 PLC 应用中，多将原停止按钮的常闭触点改为常开触点接入 PLC 输入端。

7.9.4　编程举例

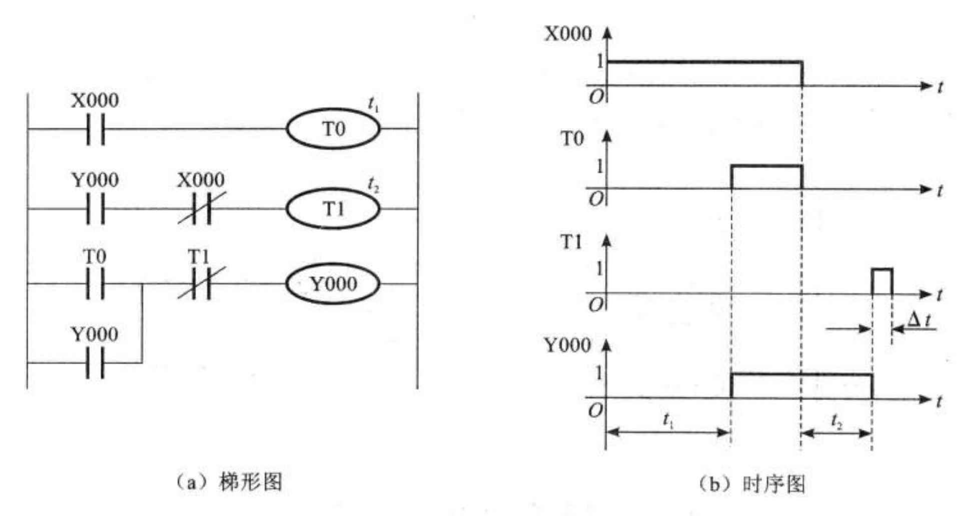
下面我们列举一些简单的例子，一方面巩固和深化我们的认知，同时也学习一些基本功能的编程。

1. 延时接通/断开功能(或称开关滞后动作)

有时需要对输入的开关信号作滞后反应，这可以用图 7-98 所示的梯形图来实现，滞后的时间可以通过两个定时器分别予以指定。图中的 Δt 为 PLC 的一个扫描工作周期时间。

2. 闪烁信号功能

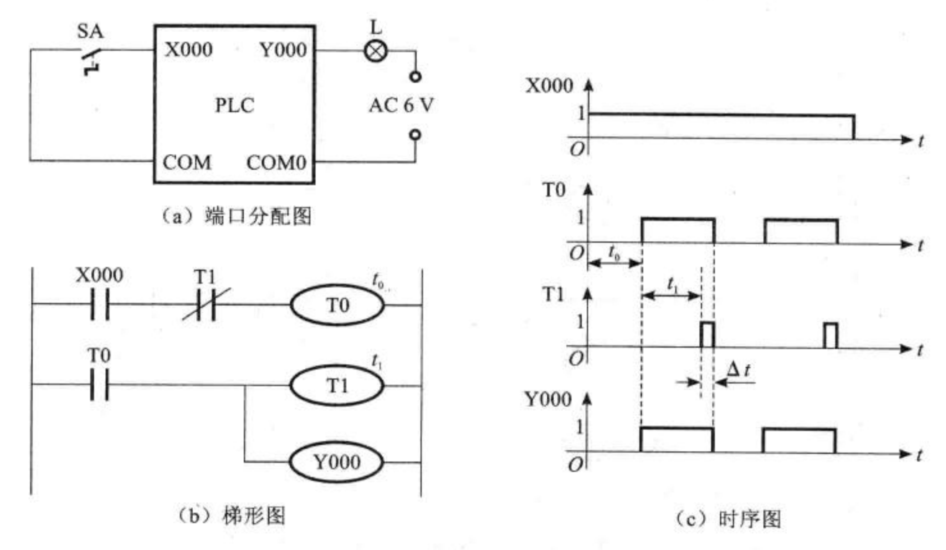
如图 7-99 所示，Y000 输出 0 的时间为 t_0，输出 1 的时间为 t_1(一个工作周



（a）梯形图　　（b）时序图

图 7-98　延时接通/断开功能

期的时间 Δt 可忽略)，转动 SA 闭合，灯 L 闪烁，闪烁周期由 t_0、t_1 决定，此信号可作报警信号。



（a）端口分配图

（b）梯形图　　（c）时序图

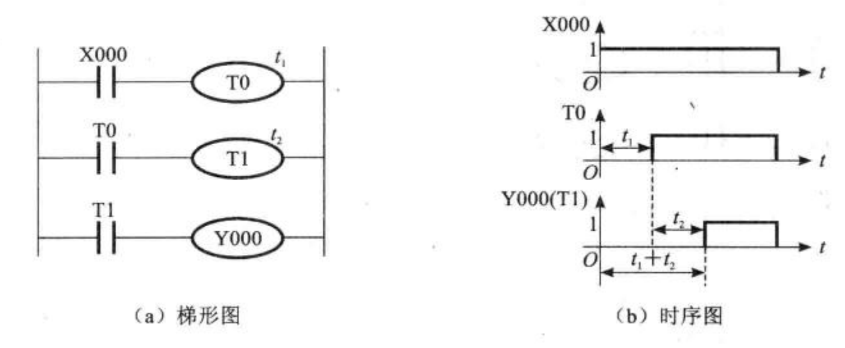
图 7-99　闪烁信号功能

3. 长时间延时方法

FX 系列 PLC 中定时器的最大定时时间为 3,276.7 s。如果实际使用中，所需延时时间更长，则可以参考如下方法。

1）串联计时器

用两个或多个定时器串联起来，这样可以获得长延时和多个时间区段信号。图7-100为两个定时器串联使用的情况。



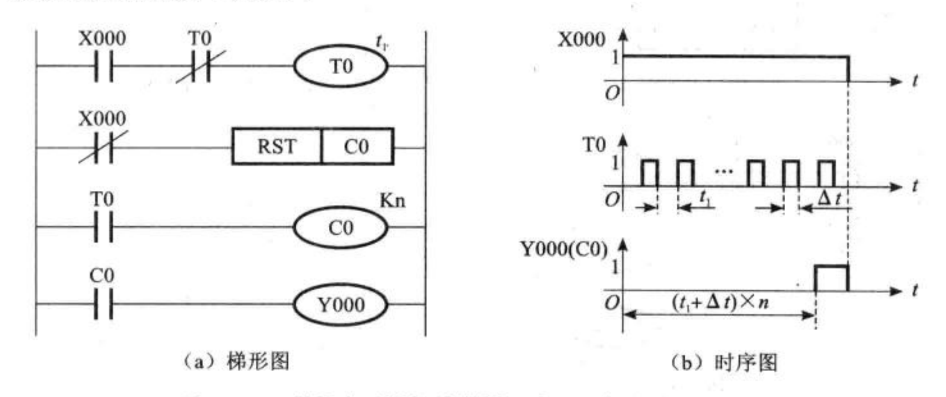
（a）梯形图　　（b）时序图

图 7-100　串联定时器以延长定时时间

需要指出，在延时期内，该图中的 X000 信号需要一直保持为“1”，否则，计时器将复位。

2）定时器与计数器组合

如图 7-101 所示，t_1 为 T0 的延时时间，n 为 C0 的计数设定值，Δt 为 PLC 的工作周期时间，从 X000 动作到 Y000 输出为 1 的延时时间为$(t_1+\Delta t)\times n$，Δt 很小，某些情况下可忽略。



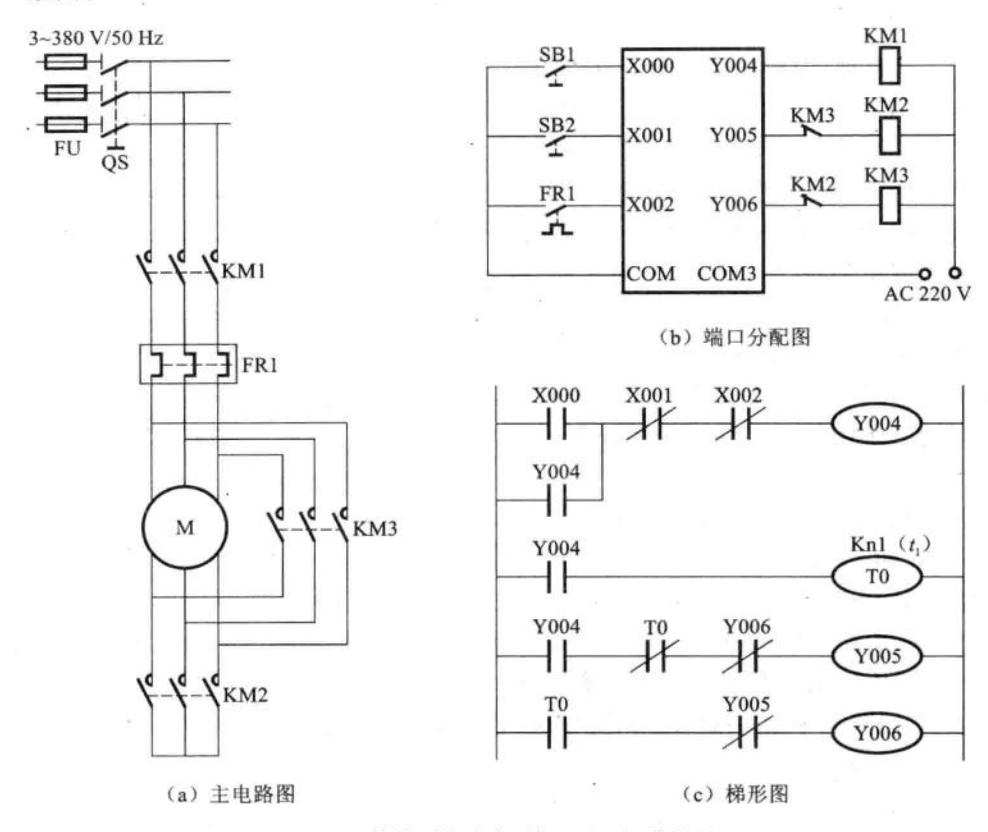
（a）梯形图　　（b）时序图

图 7-101　利用定时器与计数器组合以延长定时时间

4. 三相笼型感应电动机的 Y/△起动控制

三相笼型感应电动机 Y/△起动的 PLC 控制如图 7-102 所示，其中主电路如图 7-102(a)所示。用 PLC 实现起停控制时，需将“起动”、“停止”的开关命令

信号接入 PLC 输入端，PLC 输出端分别输出信号控制 KM1、KM2、KM3，设 PLC 的I/O端口分配如图 7-102(b)所示，则图 7-102(c)即为满足控制要求的梯形图。



(a) 主电路图 (b) 端口分配图 (c) 梯形图

图 7-102 三相笼型感应电动机 Y/△起动控制

当按下起动按钮 SB1 时，X000 为 1，使 Y004、Y005 继电器均为 1，KM1、KM2 线圈得电，电动机 Y 形起动；同时 T0 开始计时，当起动时间等于 t_1 时，T0 输出为 1，其常闭触点断开，Y005 为 0，KM2 线圈断电；T0 的常开触点闭合，Y006 为 1，电动机从 Y 形起动转为△运行。另需注意，须将梯形图中的输出继电器 Y005 与 Y006 及端口分配图中的接触器 KM2 与 KM3 之间进行互锁。

当按下停止按钮 SB2 或电动机过载使 FR1 的常开触点闭合时，X001 为 1，使 Y004、T0、Y006 继电器均为 0，KM1、KM3 线圈断电，电动机停止运行。

5. PLC 输入点不足的处理方法

PLC 应用中，由于大多数被控设备的输入信号多于输出信号，虽然 PLC 设



计也是输入点数多于输出点数，但常常还会遇到输入点不够用，特别是有些被控设备要求具有手动、自动的工作方式，手动部分或多地点控制等按钮多，占用输入点也就多。下面介绍几种解决输入点不足的方法。

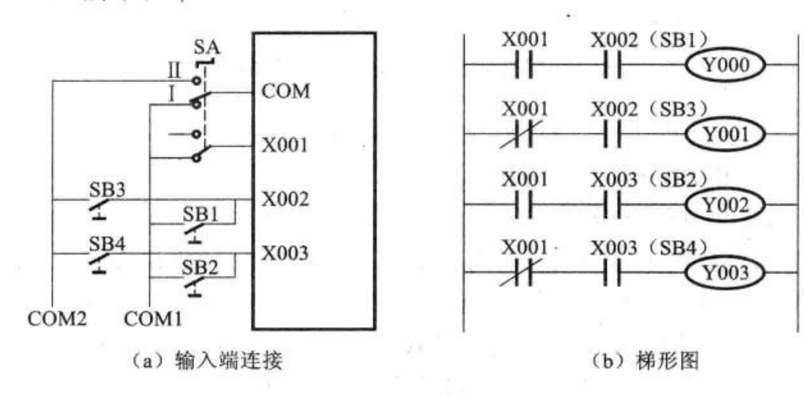
1）利用跳转指令

将自动/手动工作选择开关接入一个输入端（如 X000），结合跳转指令，就能实现一个输入端具有手动和自动操作两种功能。如图 7-103 所示，设手动时，自动/手动工作选择开关使 X000 输入继电器为 1，自动时 X000 输入继电器为 0。当 X000 为 1 时，满足 CJ P0 的条件，跳过自动工作程序，执行手动工作程序，然后进入公用程序；当 X000 为 0 时，满足 CJ P1 的条件，执行自动工作程序，跳过手动工作程序，然后进入公用程序。

图 7-103　自动/手动切换

2）切换公共端

如图 7-104 所示，在输入端的公共点 COM 和一个输入端（如 X001）上接入一个双刀转换开关 SA，它有两个工作位置 I、II，分别将 COM 接通不同的公用线 COM1 或 COM2，如图 7-104（a）所示，当 SA 处于位置 I 时，COM 接通 COM1 线，X001 为 1，开关 SB1、SB2 动作有效；当 SA 处于位置 II 时，COM 接通 COM2 线，X001 为 0，开关 SB3、SB4 动作有效。这样，一个输入端（X001）就可以分别反映两个输入信号的状态，梯形图如图 7-104（b）所示。



（a）输入端连接　　（b）梯形图

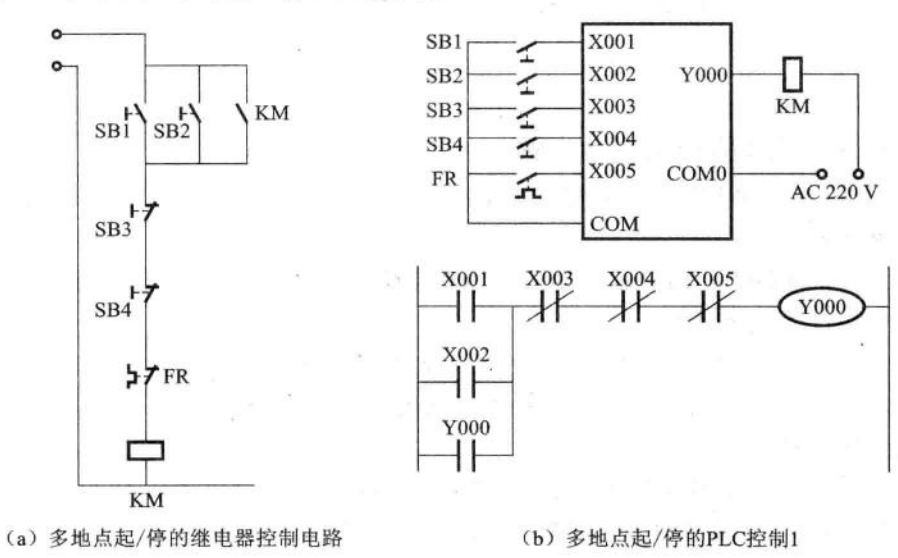
图 7-104　切换公共端

3）采用自锁开关电路

被控设备一般都需要有“起动/停止”控制功能，利用带自锁结构的开关，就可以实现一个输入端接上一个自锁开关进行起动/停止两种控制，从而也就节省了输入点数。

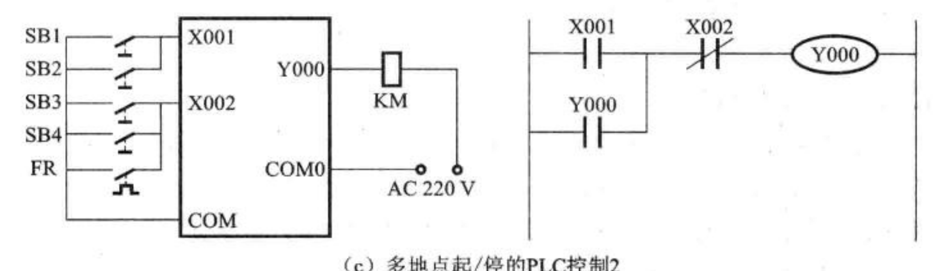
4）对相同功能的开关，采用并联输入的方式

如图 7-105 所示，以具有多地点起动/停止功能的电动机继电器控制电路为例进行说明。图 7-105(a)为继电器控制电路，可以在两处操作起动和停止。使用 PLC 控制时，外部输入有不同的接线方式，见图 7-105(b)和图 7-105(c)。



（a）多地点起/停的继电器控制电路

（b）多地点起/停的PLC控制1



（c）多地点起/停的PLC控制2

图 7-105　多地点起/停的 PLC 控制

比较图 7-105(b)和图 7-105(c)，图 7-105(b)的接线形式占用 PLC 的输入点较多，但判断输入开关故障直观，若 PLC 的输入点比较宽裕可采用这种接线方式；图 7-105(c)的接线形式占用 PLC 输入点较少，梯形图也比较简单，在

PLC 输入点数不够时，就可采用这种接线方式。

以上所介绍的是解决输入点少的几种有效方法。但若输入点少得太多，用这些方法还是不能解决问题，则必须通过增加扩展单元或扩展模块来增加输入点数。

7.10 可编程控制器的应用

7.10.1 PLC 的应用设计步骤

(1) 首先必须仔细分析被控对象的控制过程与要求，按工艺的要求画出工作循环图。

(2) 确定接入 PLC 输入端的器件和接受 PLC 输出控制的器件，画出输入输出接口端子分配图。

(3) 画出梯形图。对于一些复杂的控制，则需要先进一步画出较详细的功能流程图(类似于计算机编程时的程序框图，但较之更为详细与具体)，在此基础上画出梯形图。

(4)上机。按梯形图或指令语句形式将程序通过 PC 机送入 PLC 内存，然后模拟调试，如不符合要求，则修改程序，全部调试好后，就可进入现场总装试车，若运行满足要求，即可交用户使用。

7.10.2 应用举例

【例 7-1】 要求按时间原则实现机械手的夹紧→正转→松开→反转。机械手由气压系统驱动，将电磁阀 1YV、2YV、3YV、4YV 通电，分别控制机械手夹紧、松开、正转、反转。1YV 通电后即使断电(只要 2YV 不通电)亦能维持夹紧；同理，2YV 通电后即使断电(只要 1YV 不通电)亦能维持松开。设夹紧、松开时间各为 10 s，正转、反转时间各为 15 s，则机械手的工作循环如图 7-106 所示。

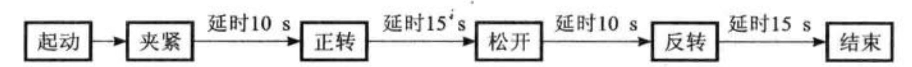


图 7-106 按时间顺序控制的机械手工作循环

由于自动循环按时间原则进行，输入端只需设起/停按钮；输出端除 1YV～4YV 的输出外，另设 4 个指示灯，以显示机械手的工作状态。I/O 端口分配如图 7-107 所示。

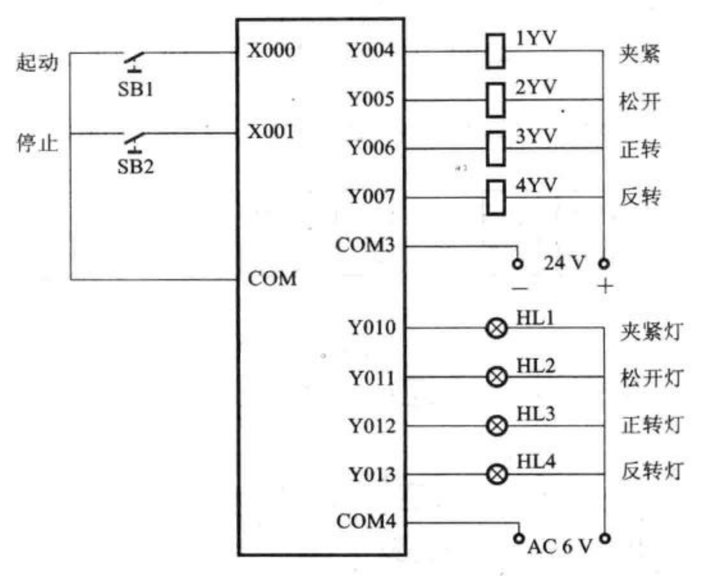


图 7-107 机械手按时间顺序控制 I/O 端口分配

定义如下继电器：

M101——记忆起动按钮状态；

T101——夹紧延时，延时时间为 10 s；

T102——正转延时，延时时间为 15 s；

T103——松开延时，延时时间为 10 s；

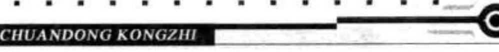
T104——反转延时，延时时间为 15 s。

在上述基础上，画出详细的功能流程图，如图 7-108(a)所示，然后根据流程图绘制梯形图、编写指令表。

此题亦可由 M101 触点同时接通 T101～T104 四个定时器，将 T102 延时数改为 35 s，T104 延时数改为 50 s，这样编程可以少写三条指令。

【例 7-2】 将上例要求改为按行程控制原则，并采用移位指令实现机械手的步进控制。

设机械手由气压系统驱动的情况不变，并设原位行程开关为 SQ1，夹紧到位压合行程开关为 SQ2，正转到位压合行程开关为 SQ3，松开到位压合行程开关为 SQ4，则机械手的工作循环如图 7-109 所示。



（a）功能流程图

（b）梯形图

步序	指令	器件
0	LD	X000
1	OR	M101
2	ANI	X001
3	ANI	T104
4	OUT	M101
5	LD	M101
6	OUT	T101 K100
9	LD	M101
10	ANI	T101
11	OUT	Y004
12	LD	M101
13	ANI	T102
14	OUT	Y010
15	LD	T101
16	OUT	T102 K150
19	LD	T101
20	ANI	T102
21	OUT	Y006
22	OUT	Y012
23	LD	T102
24	OUT	T103 K100
27	LD	T102
28	ANI	T103
29	OUT	Y005
30	LD	T102
31	ANI	T104
32	OUT	Y011
33	LD	T103
34	OUT	T104 K150
37	LD	T103
38	ANI	T104
39	OUT	Y007
40	OUT	Y013
41	END	

（c）指令程序

图 7-108　机械手按时间顺序控制



图 7-109 机械手按空间位置顺序控制的工作循环

端口分配图如图 7-110 所示。由于按行程原则控制，各行程开关需要接入输入端；为了调整方便，还设有一个手动复位按钮。

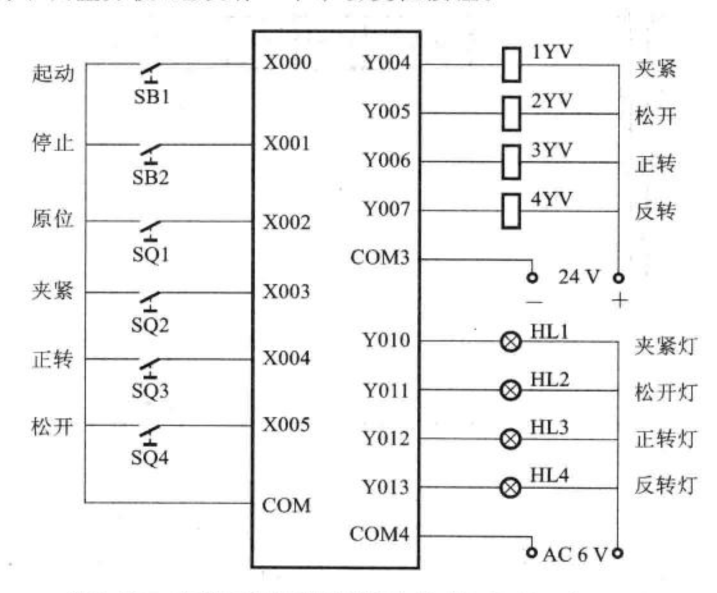


图 7-110 机械手按空间位置顺序控制 I/O 端口分配

梯形图如图 7-111 所示，机械手的工作过程分析如下。

(1) 当机械手处于原位时，移位的继电器应处于复位状态，同时复位行程开关 SQ1 压合，输入继电器 X002 为 1，程序使 M100 置 1。

(2) 按下起动按钮，X000 为 1，产生移位信号，使 M101～M104 左移一位，M100 的 1 移入 M101，使 Y004 为 1，接通 1YV，执行夹紧动作；Y010 为 1，夹紧指示灯 HL1 亮；M100 为 0。

(3) 夹紧到位，SQ2 被压下，X003 为 1，产生移位信号，M100 的 0 移入 M101，使 Y004 为 0，1YV 失电，同时原 M101 的 1 移位到 M102，使 Y006 为 1，3YV 得电，执行正转动作；Y012 为 1，正转指示灯 HL3 亮；同时 M102 为 1，使 Y010 继续为 1，夹紧指示灯 HL1 继续亮；M100 为 0。



X002 M101 M102 M103 M104 M100

M104 X002 ZRSTP M100 M104
X001

X000 M100 SFTLP M100 M101 K4 K1
X003 M101
X004 M102
X005 M103

M101 Y004 夹紧

M102 Y006 正转
Y012 正转指示灯

M103 Y005 松开

M104 Y007 反转
Y013 反转指示灯

M101 Y010 夹紧指示灯
M102

M103 Y011 松开指示灯
M104

END

图 7-111　梯形图

(4) 正转到位,SQ3 被压下,X004 为 1,产生移位信号,M101 的 0 移到 M102,原 M102 的 1 移到 M103。M102 为 0,使 Y006 为 0,3YV 失电,正转指示灯 HL3 灯熄,Y010 为 0,夹紧灯 HL1 熄;M103 为 1,使 Y005 为 1,2YV 得电,执行松开动作;Y011 为 1,松开指示灯 HL2 亮;M100 为 0。

(5) 松开到位,SQ4 被压下,X005 为 1,产生移位信号,M102 的 0 移位到 M103,原 M103 的 1 移位到 M104。M103 为 0,使 Y005 为 0,2YV 失电。M104 为 1,使 Y007 为 1,4YV 得电,执行反转动作;Y011 继续为 1,松开指示灯 HL2 继续亮;Y013 为 1,反转指示灯 HL4 亮;M100 为 0。

(6) 当反转到原位,SQ1 被压下,X002 为 1,使 M100～M104 复位,各指示灯熄灭,机械手处于原位。

若再次按下起动按钮,即可重复上述步进控制。

机械手按空间位置顺序控制的指令程序如下:

步序	指令	器件	步序	指令	器件
0	LD	X002	24	ORB	
1	ANI	M101	25	SFTLP	M100 M101 K4 K1
2	ANI	M102	34	LD	M101
3	ANI	M103	35	OUT	Y004
4	ANI	M104	36	LD	M102
5	OUT	M100	37	OUT	Y006
6	LD	M104	38	OUT	Y012
7	AND	X002	39	LD	M103
8	OR	X001	40	OUT	Y005
9	ZRSTP	M100 M104	41	LD	M104
14	LD	X000	42	OUT	Y007
15	AND	M100	43	OUT	Y013
16	LD	X003	44	LD	M101
17	AND	M101	45	OR	M102
18	ORB		46	OUT	Y010
19	LD	X004	47	LD	M103
20	AND	M102	48	OR	M104
21	ORB		49	OUT	Y011
22	LD	X005	50	END	
23	AND	M103			

【例 7-3】 机械手的控制要求及端口分配图同上例 7-2,要求用步进梯形图指令编制程序。

这种步进式顺序控制用 STL 指令来编程是相当方便的。首先根据各步输出的条件画出顺序功能图(即状态转移图)如图 7-112 所示。再根据起/停等控制要求和状态转移图,可画出如图 7-113 所示的梯形图,其指令程序如图 7-114 所示。

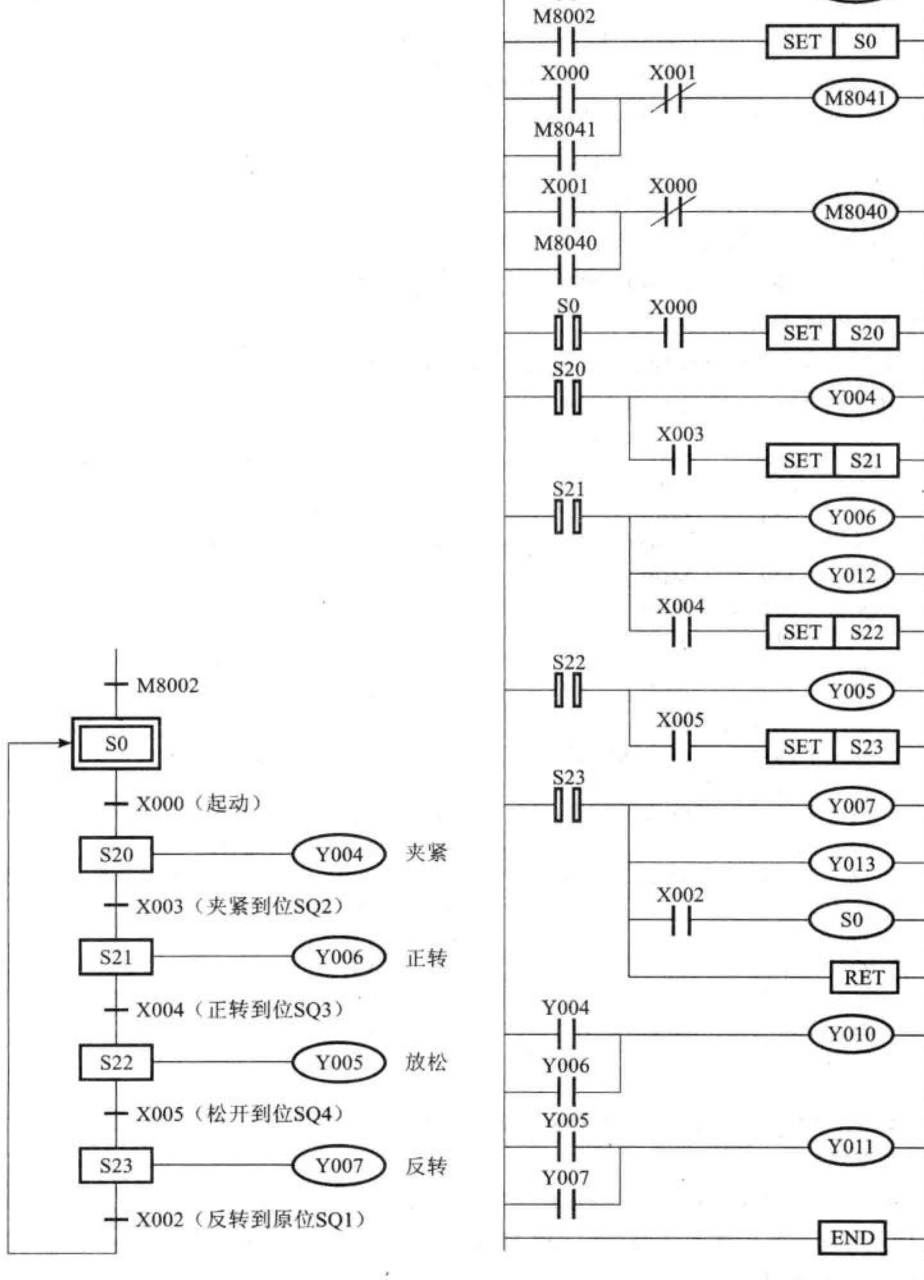


图 7-112　机械手状态转移图

图 7-113　机械手的 STL 控制梯形图

在梯形图中，M8047 为 STL 监控有效继电器，当驱动该继电器为 1 时进行 STL 监控。当驱动 M8047 为 1 时，正在动作（ON）状态（除报警状态以外的状态）的最新编号保存到 D8040 中，下一个动作的状态编号保存到 D8041 中，以此类推，直到 D8047，依次保存动作状态共 8 点，这样可在监视屏中自动读出正在动作的状态并加以显示。还有一个显示 STL 动作的继电器 M8046，当任意状态（除报警状态以外的状态）为 ON 时，M8046 自动为 1，监视该继电器，可避免与其他流程同时起动或用作为工序的动作标志位。

M8000 在 PLC 从 STOP→RUN 时为 1；当驱动 M8041 为 1 时，允许从初始状态开始进行状态转移；当驱动 M8040 为 1 时，禁止所有状态之间的转移，在此情况下，由于 ON 状态内的程序仍然在运行，所以该状态内的输出不会断开。

在 PLC 从 STOP→RUN 时，M8002 输出一个时间为工作周期的 1 的脉冲，S0 初始状态置 1；按起动按钮 SB1，M8041 为 1，允许状态转移，并且 S20 置 1，S0 清零；Y004 输出为 1，机械手夹紧，当机械手夹紧到位压 SQ2 时，置 S21 为 1 且清 S20 为 0，Y004 输出为 0，但仍能夹紧；S21 为 1，Y006 输出为 1，进行正转；如此由行程开关触发状态之间的转移，进行输出的通断控制。

当按停止按钮 SB2 时，M8040 为 1，禁止状态转移，机械手暂停在某一位置；当再按起动按钮 SB1 时，机械手从暂停处继续动作；当返回到原位压 SQ1（X002）时，置 S0 为 1，需再按起动按钮 SB1，S20 才置 1，机械手又开始一轮循环动作。

步序	指令	器件	步序	指令	器件
0	LD	M8000	27	OUT	Y012
1	OUT	M8047	28	LD	X004
3	LD	M8002	29	SET	S22
4	SET	S0	31	STL	S22
6	LD	X000	32	OUT	Y005
7	OR	M8041	33	LD	X005
8	ANI	X001	34	SET	S23
9	OUT	M8041	36	STL	S23
11	LD	X001	37	OUT	Y007
12	OR	M8040	38	OUT	Y013
13	ANI	X000	39	LD	X002
14	OUT	M8040	40	SET	S0
16	STL	S0	42	RET	
17	LD	X000	43	LD	Y004
18	SET	S20	44	OR	Y006
20	STL	S20	45	OUT	Y010
21	OUT	Y004	46	LD	Y005
22	LD	X003	47	OR	Y007
23	SET	S21	48	OUT	Y011
25	STL	S21	49	END	
26	OUT	Y006			

图 7-114　机械手 STL 指令程序



【例 7-4】 物品分选系统的 PLC 控制。

图 7-115 为一个简单的物品分选系统。物品由传送带发送，传送带的主动轮由一台交流感应电动机 M 拖动，该电动机的通断由接触器 KM 控制；从动轮上装有脉冲发生器 LS，每发送一个物品，LS 发出一个脉冲，作为物品发送的检测信号；次品检测在传送带的 0 位进行，由光电检测装置 PH1 检测，当次品在传送带上继续往前走，到 4 号位置时应使电磁铁 YV 通电，电磁铁向前推，次品落下，当光电开关 PH2 检测到次品落下时，给出信号，让电磁铁 YV 断电，电磁铁缩回；正品则到第 9 号位置时装入箱中，光电开关 PH3 为正品装箱计数检测用。

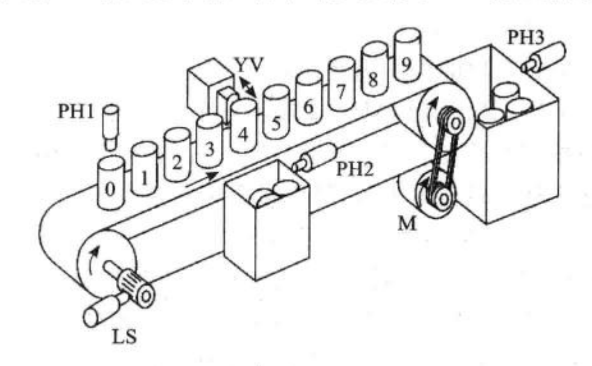


图 7-115 物品分选系统

根据题意，可以选用移位指令和计数器实现次品剔除及正品计数的功能。PLC 的 I/O 端口分配如图 7-116 所示，图 7-117 为梯形图程序。

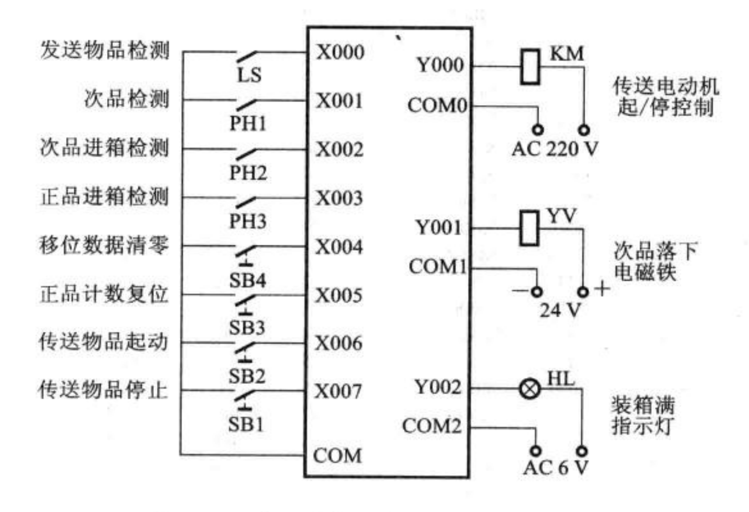


图 7-116 物品分选系统 PLC 端口分配

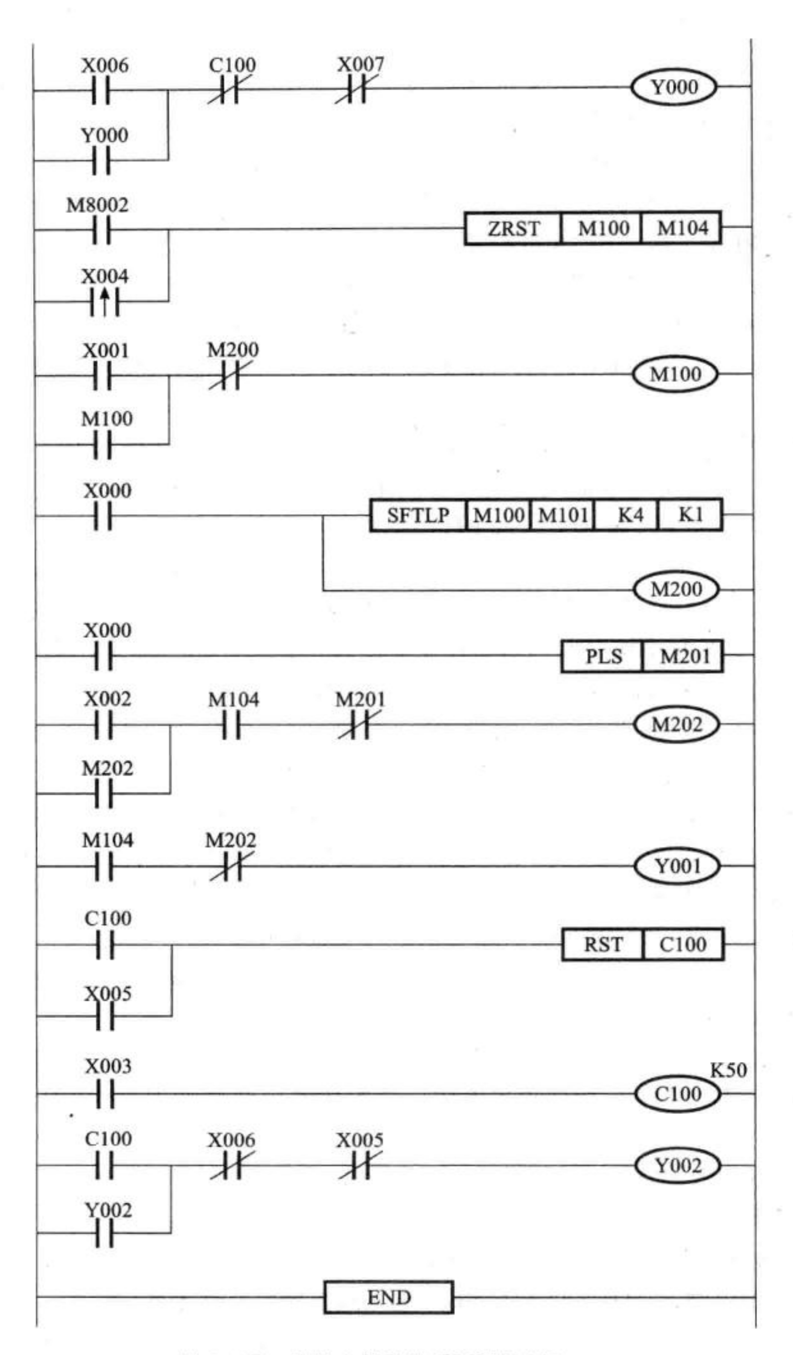


图 7-117 物品分选系统 PLC 梯形图



物品分选工作过程分析如下。

传送电动机 M 的起动按钮 SB2 接输入端 X006，停止按钮 SB1 接输入端 X007，按下 SB2，X006 为 1，使输出继电器 Y000 为 1，接通接触器 KM，电动机 M 起动运行，传送带开始发送物品。脉冲发生器 LS 的信号从 X000 端输入，作为 SFTLP 指令的移位信号，当每发送一个物品时，X000 端输入一个脉冲，使移位继电器内容左移一位，光电检测器 PH1 的信号从 X001 端输入，作为 M100 的数据输入信号。当检测到次品时，X001 为 1(产品合格为“0”)，使 M100 为 1，之后由于移位脉冲 X000 的移位作用，使 M100 中的次品数据 1 左移；同时 X000 为 1，使 M200 继电器为 1，在 PLC 的下一个工作周期，M200 的常闭触点断开，使 M100 置 0。

当次品数据经 4 次左移而使 M104 为 1 时，此时次品已传送到 4 号装置，M104 为 1，使输出继电器 Y001 为 1，接通电磁铁 YV，电磁铁向前推，次品落下；PH2 信号接输入端 X002，当 PH2 检测到次品落下时，X002 为 1，使 M202 为 1，从而使 Y001 为 0，YV 失电，电磁铁缩回，以免将跟在次品后的正品误作次品剔除，在下一个移位脉冲到来时，M201 输出宽度为一个工作周期的单脉冲，使 M202 继电器复位为 0，其常闭触点闭合，为下一次 Y001 为 1 做好准备。

正品装箱计数信号光电开关 PH3 接入输入端 X003，每落下一个正品，X003 端输入一个脉冲，通过计数器 C100 计数(设每箱计数值为 50)，当计到规定件数时，C100 输出为 1，C100 常开触点闭合，使 Y002 为 1，指示灯 HL(或喇叭)告知装箱已满；其常闭触点断开，使 Y000 为 0，传送电动机停止运行；C100 常开触点闭合，复位计数器 C100。待工作人员拖走并放好接物品的空箱后，按下起动按钮 SB2，X006 为 1，传送电动机重新起动，同时使 Y002 复位，“装箱满”指示灯 HL 熄灭，又继续次品剔除与正品的计数装箱工作。

M100～M104 的复位按钮 SB4(接输入端 X004)、计数器的复位按钮 SB3(接输入端 X005)，供需要时使用。

相应的指令程序如图 7-118 所示。

【例 7-5】 用 PLC 控制抢答系统。抢答比赛示意图如图 7-119 所示，控制要求如下：

(1) 竞赛者若要抢答主持人所提问题，需抢先按下桌上的按钮；

(2) 指示灯亮后须待主持人按下“复位”键 R 后才熄灯；

(3) 对初中班学生优惠，SB11、SB12 中任一个按钮按下时灯 HL1 点亮；对高三班学生限制，灯 HL3 只有在 SB31 和 SB32 都按下时才亮。

(4) 若在主持人按下“开始”键 S 后 10 s 内有抢答按钮压下，则电磁铁 YC 得电，使彩球摇动，以示竞赛者得到一次幸运的机会。

步序	指令	器件	步序	指令	器件
0	LD	X006	32	OR	M202
1	OR	Y000	33	AND	M104
2	ANI	C100	34	ANI	M201
3	ANI	X007	35	OUT	M202
4	OUT	Y000	36	LD	M104
5	LD	M8002	37	ANI	M202
6	ORP	X004	38	OUT	Y001
8	ZRST	M100 M104	39	LD	C100
13	LD	X001	40	OR	X005
14	OR	M100	41	RST	C100
15	ANI	M200	43	LD	X003
16	OUT	M100	44	OUT	C100 K50
17	LD	X000	47	LD	C100
18	SFTLP	M100 M101 K4 K1	48	OR	Y002
27	OUT	M200	49	ANI	Y006
28	LD	X000	50	ANI	Y005
29	PLS	M201	51	OUT	Y002
31	LD	X002	52	END	

图 7-118 物品分选系统 PLC 指令程序



图 7-119 抢答比赛示意图



PLC 的 I/O 端口分配如图 7-120 所示。

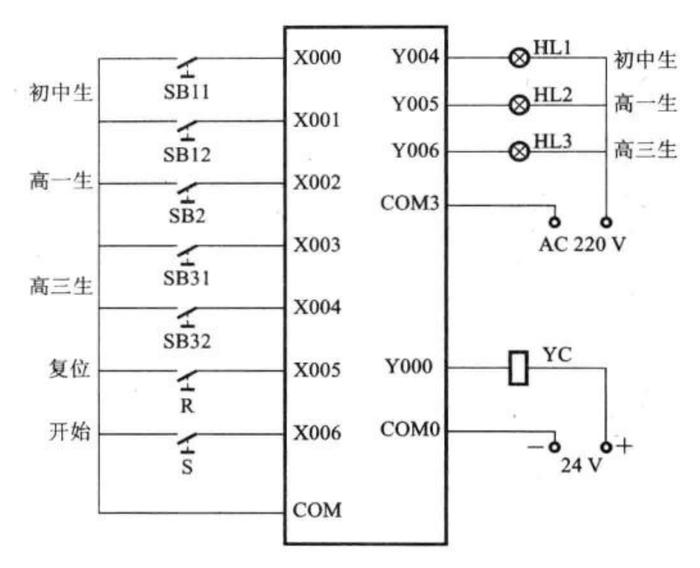


图 7-120 抢答比赛系统 PLC 端口分配

根据题意,此题的控制关系用逻辑式表示比较方便。各灯点亮及电磁铁得电的逻辑关系式如下:

$HL1 = \overline{R} \times S \times (SB11 + SB12) \times \overline{HL2} \times \overline{HL3}$

$HL2 = \overline{R} \times S \times SB2 \times \overline{HL1} \times \overline{HL3}$

$HL3 = \overline{R} \times S \times SB31 \times SB32 \times \overline{HL1} \times \overline{HL3}$

$YC = (HL1 + HL2 + HL3) \times \overline{T}$ (T 为计时 10 s 的定时器)

根据逻辑关系式和 I/O 端口分配,画出梯形图如图 7-121 所示,指令程序如图 7-122 所示。

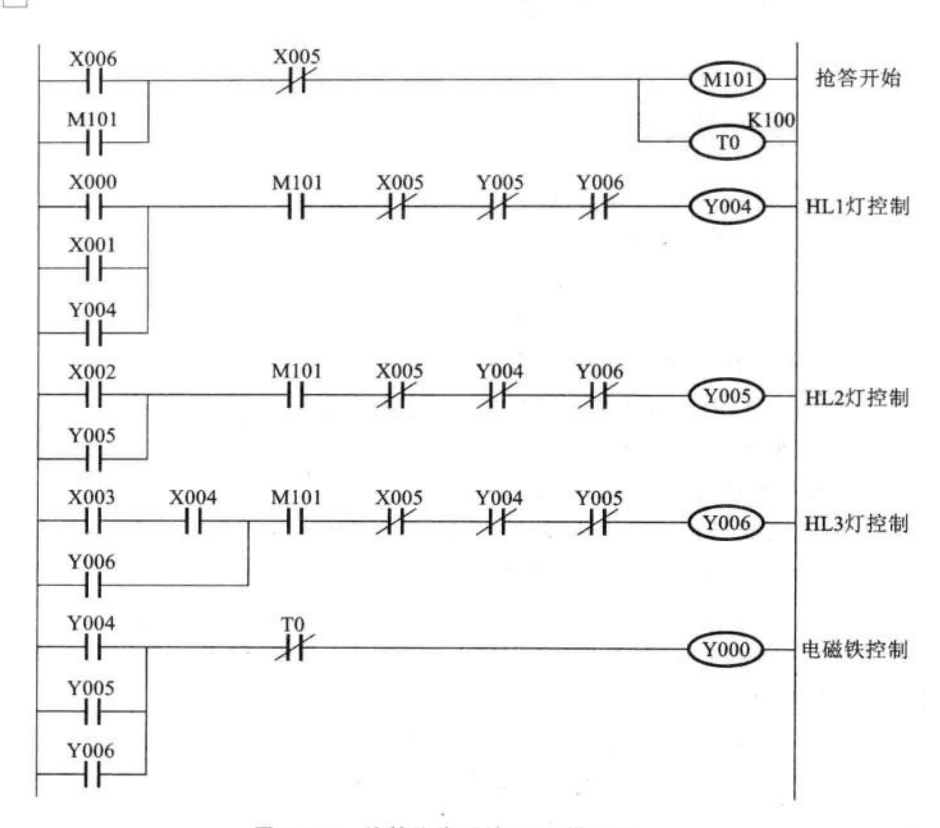


图 7-121 抢答比赛系统 PLC 梯形图

步序	指令	器件	步序	指令	器件
0	LD	X006	19	ANI	Y004
1	OR	M101	20	ANI	Y006
2	ANI	X005	21	OUT	Y005
3	OUT	M101	22	LD	X003
4	OUT	T0 K100	23	AND	X004
7	LD	X000	24	OR	Y006
8	OR	X001	25	AND	M101
9	OR	Y004	26	ANI	X005
10	AND	M101	27	ANI	Y004
11	ANI	X005	28	ANI	Y005
12	ANI	Y005	29	OUT	Y006
13	ANI	Y006	30	LD	Y004
14	OUT	Y004	31	OR	Y005
15	LD	X002	32	OR	Y006
16	OR	Y005	33	ANI	T0
17	AND	M101	34	OUT	Y000
18	ANI	X005	35	END	

图 7-122 抢答比赛系统 PLC 指令程序

思考与练习

1. 可编程控制器的分类方法有哪几种？如何分类？

2. PLC基本单元由哪几部分组成？各部分起什么作用？

3. 简述PLC与继电器控制在工作方式上各有什么特点？

4. 与继电器控制系统相比，PLC控制系统有哪些优点？

5. FX系列PLC型号中各部分的含意是什么？

6. 简述PLC的扫描周期工作过程，其扫描时间主要受什么影响？

7. 什么叫软元件？FX系列PLC中有哪些软元件，它们的编号和作用是什么？何种软元件的编号采用八进制？

8. PLC常用的编程语言有哪些？各有什么特点？

9. FX系列的高速计数器有哪几种类型？计数器C200～C234的计数方向如何规定？

10. 在一般的PLC梯形图中，为什么不允许"双线圈"现象？哪些特殊情况又允许这种现象发生？

11. 为什么PLC梯形图中同一编号的触点可以使用无限多次？

12. 为什么梯形图中不能有输入继电器X的线圈(即OUT指令不能用于X继电器)？

13. 为了及时响应PLC的输入开关信号，在什么情况下需要采用中断的方式来编制程序？请简述具体原因。

14. 指出图7-123所示梯形图或端口分配图中的错误，并画出正确的图。

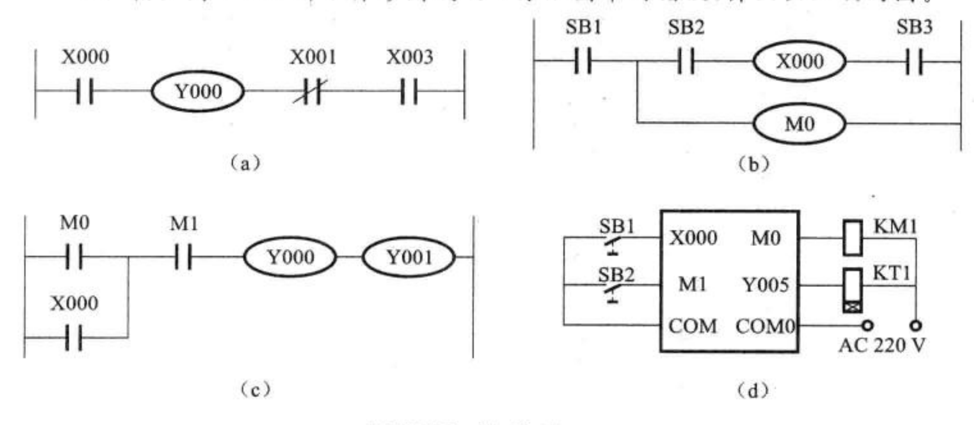
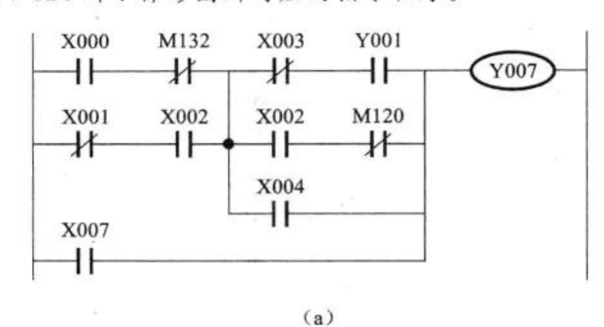
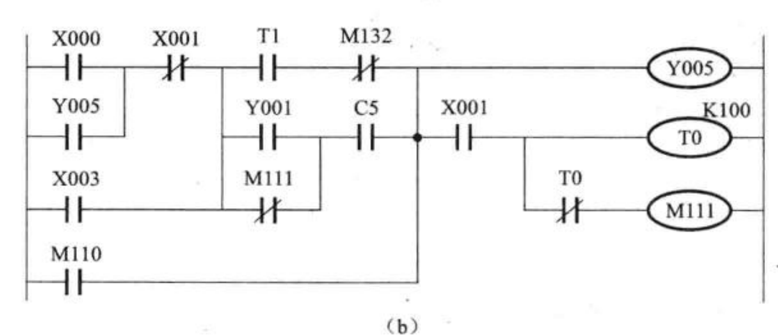


图7-123 题14图

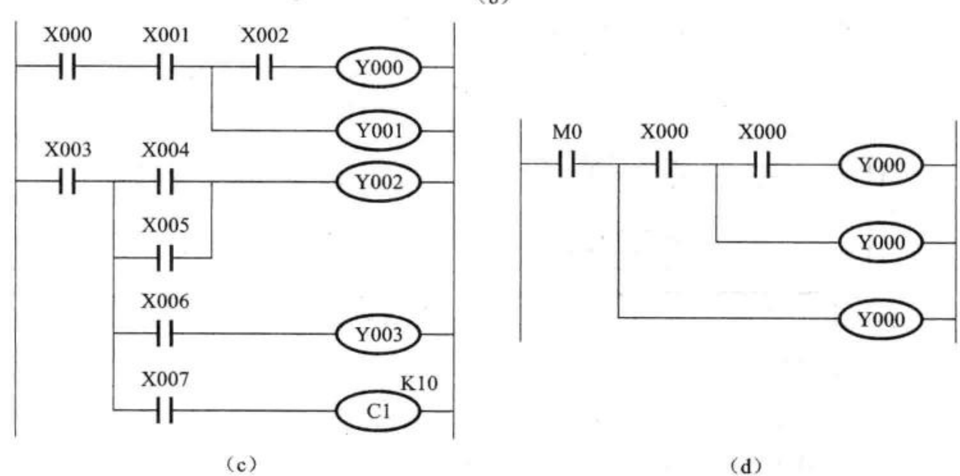
15．写出图 7-124 所示梯形图所对应的指令程序。



(a)



(b)



(c)　　　　(d)

图 7-124　题 15 图



16. 画出下面各指令表程序对应的梯形图。

(a)

指令	器件
LD	M200
ORI	X000
LD	X001
ANI	X002
OR	M315
AND	X003
LD	M101
ANI	M102
ORB	
ANB	
ORI	X005
OUT	M105
END	

(b)

指令	器件
LD	M150
ANI	X001
OR	M200
AND	X002
LD	M201
ANI	M202
ORB	
LDI	X004
ANI	X005
ANB	
OR	M203
SET	M4
ANI	X011
OUT	Y004
AND	X010
OUT	M100
END	

(c)

指令	器件
LD	X012
OR	Y006
MPS	
ANDP	X017
INV	
OUT	Y002
MRD	
AND	X007
ANI	Y003
OUT	C2 K6
MPP	
AND	X013
RST	C2
END	

17. 画出图 7-125 中 M100 的波形图。

18. 画出图 7-126 中 Y000 的波形图。

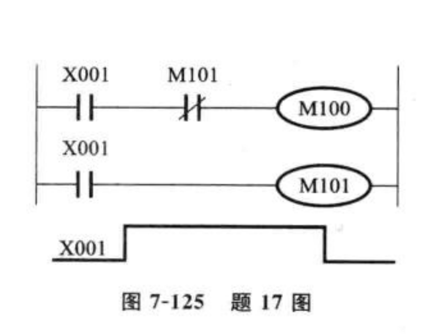


图 7-125 题 17 图

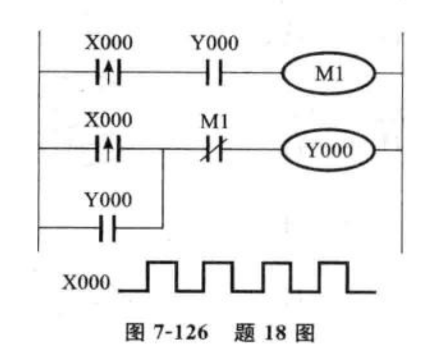


图 7-126 题 18 图

19. 改画图 7-127 中的梯形图，使对应的指令表程序最短。

20. 用 SET、RST 和边沿检测触点指令，设计满足图 7-128 所示波形图的梯形图。

21. 按下 X000 端的输入按钮(常开触点)后，Y000～Y002 按图 7-129 所示时序变化，请设计梯形图。

22. 设计满足图 7-130 所示波形的梯形图。



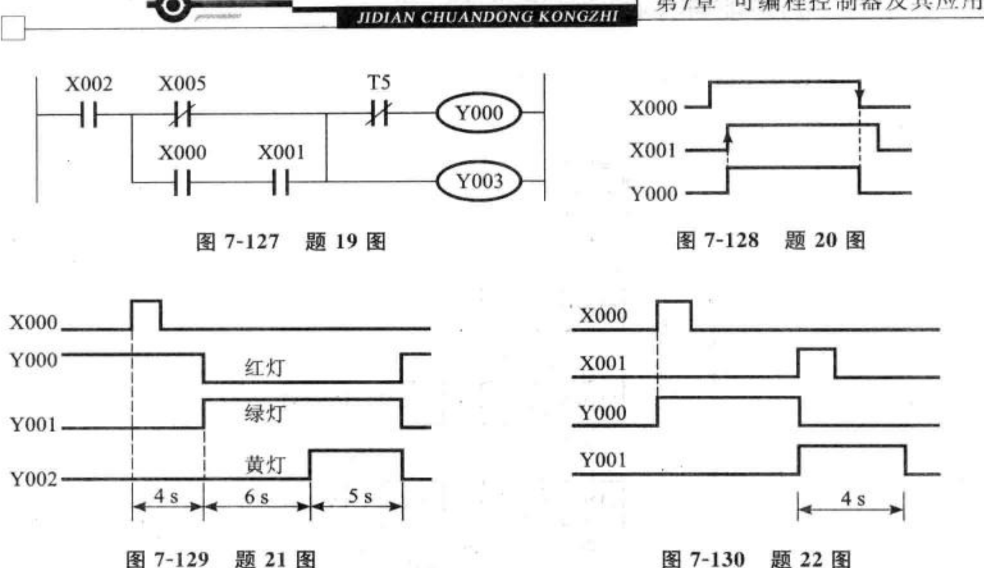


图 7-127　题 19 图

图 7-128　题 20 图

图 7-129　题 21 图

图 7-130　题 22 图

23. 图 7-131 中的 3 条运输带顺序相连，分别由三相感应电动机拖动。按下起动按钮，3 号运输带开始工作，5 s 后 2 号自动起动，再过 5 s 后 1 号自动起动。停机的顺序与起动的顺序相反，间隔仍然为 5 s。请设计 PLC 控制的端口分配图和梯形图。

24. 如图 7-132 所示，粉末冶金制品压制机装好金属粉末后，按下起动按钮 SB1（接 X000），冲头下行，将粉末压紧后压力继电器（接 X001）为 1 状态，保压延时 5 s 后，冲头上行，压行程开关 SQ1（X002 变为 1 状态），然后模具下行到位压行程开关 SQ3（X003 变为 1 状态），取走成品后工人按下按钮 SB2（接 X005），模具上行压 SQ2（X004 变为 1 状态），系统返回初始状态。请设计主电路、PLC 端口分配图和梯形图。

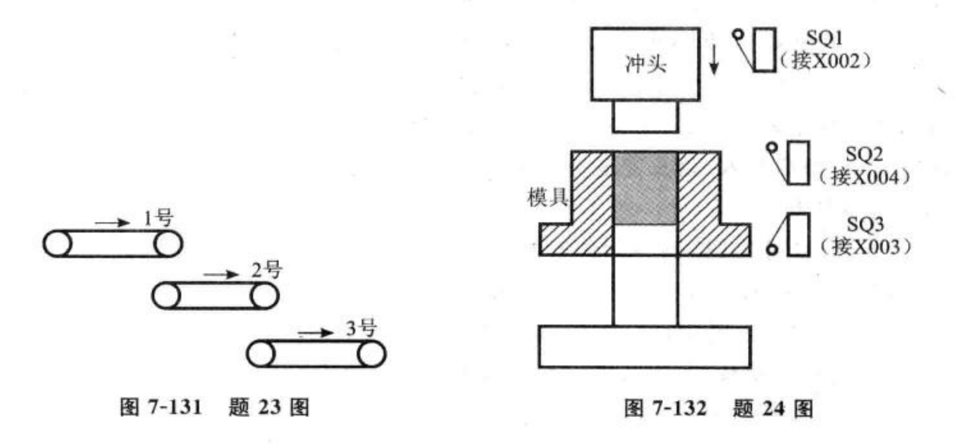


图 7-131　题 23 图

图 7-132　题 24 图



25. 如图 7-133 所示的顺序功能图，请完成：

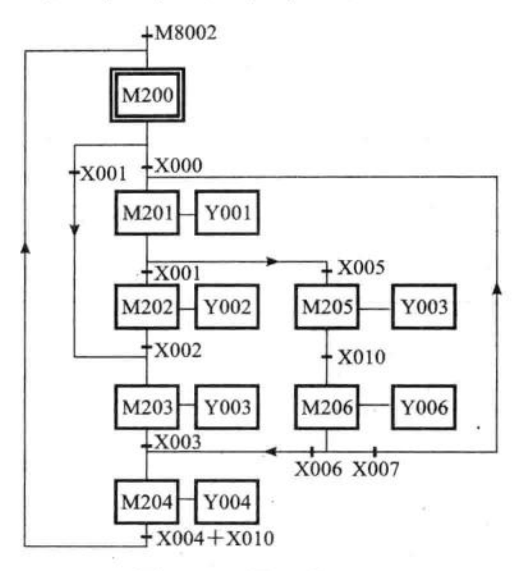


图 7-133　题 25 图

(1) 用 SET、RST 指令设计对应的梯形图；

(2) 将 M200、M201～M206 改为 S0、S21～S26，用 STL 指令设计对应的梯形图。

26. 液体混合装置如图 7-134 所示，SLH、SLI 和 SLL 是上、中、下液位传感器，它们被液体淹没时状态位 1，YV1～YV3 为电磁阀。开始时容器是空的，各阀门均关闭，各传感器均为 0 状态。按下起动按钮后，阀 A 打开，液体 A 流入容器，SLI 变为 1 状态时；关闭阀 A，打开阀 B，液体 B 流入容器；当液面到达 SLH 时，关闭阀 B，电动机 M 开始运行，搅动液体，30 s 后停止搅动，打开阀 C，放出液体；当液面降到 SLL 后再过 2 s，容器放空，关闭阀 C，然后开始下一周期的操作。按下停止按钮，在当前工作周期的操作结束后，才停止操作(停在初始状态)。请给各输入/输出变量分配元件号，画出顺序功能图，设计 PLC 端口分配图及梯形图。

27. 依据图 7-135 所示的三相感应电动机 Y-△起动的工作时序图，试画出主电路图、PLC 的端口分配图和梯形图。

28. 送料车如图 7-136 所示，该车由三相感应电动机拖动。电动机正转，车子前进；电动机反转，车子后退。对送料车的控制要求如下。

(1) 单周期工作方式。每按动送料按钮，预先装满料的车子便自动前进，到

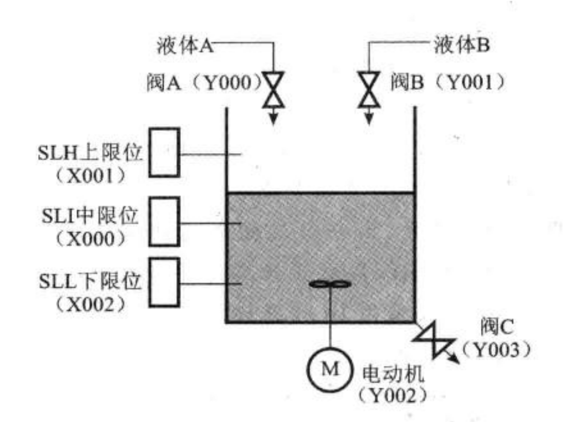


图 7-134 题 26 图

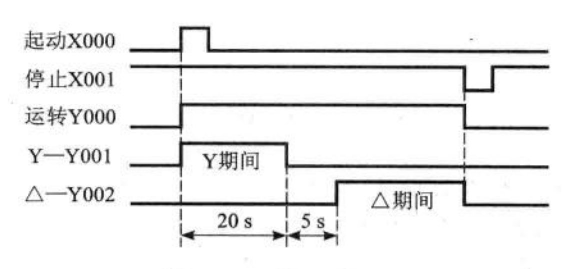


图 7-135 题 27 图

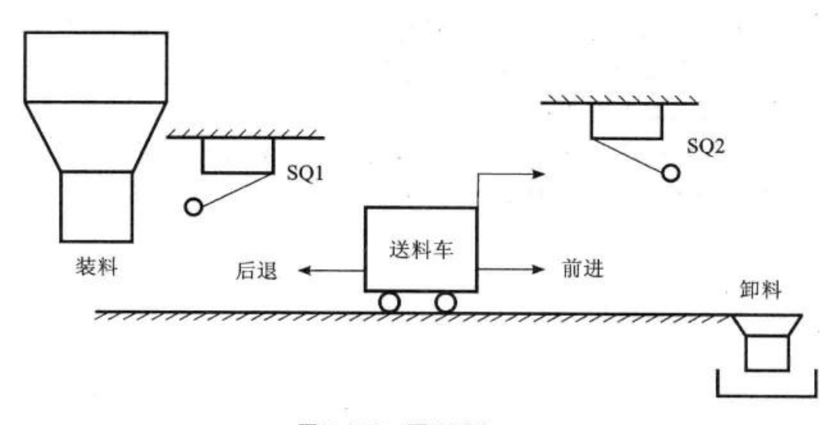


图 7-136 题 28 图

达卸料处(SQ2)自动停下来卸料，经延时 t_1 后，卸料完毕，车子自动返回装料处(SQ1)，装满料待命。再按动送料按钮，重复上述工作过程。



(2) 自动循环方式。要求车子在装料处装满料后就自动前进送料，即延时 t_2 装满料后，就不需要按动送料按钮，就在此前进，重复上述过程，实现送料车自动送料。

试用 PLC 对车子进行控制，画出满足单周期工作和自动循环工作两种方式的端口分配图、梯形图，并编写其指令程序。

29. 一台间歇润滑用油泵，由一台三相交流电动机拖动，其工作情况如图 7-137所示。按下起动按钮 SB1，系统开始工作并自动重复循环，直至按下停止按钮 SB2，系统停止工作。设采用 PLC 进行控制，请绘出主电路图、PLC 的 I/O 端口分配图、梯形图以及编写指令程序。

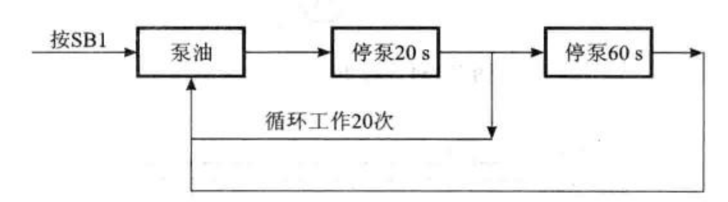


图 7-137　题 29 图

30. 设计一个顺序控制系统，要求如下：3 台电动机，按下起动按钮时，M1 先起动，运行 2 s 后 M2 起动，再运行 3 s 后 M3 起动；按下停止按钮时，M3 先停止，3 s 后 M2 停止，2 s 后 M1 停止。在整个系统起动过程中，也应能完成逆序停止，例如在 M2 起动后和 M3 起动前，按下停止按钮，M2 停止，2 s 后 M1 停止。画出 PLC 端口分配图、状态转移图和梯形图，写出指令表程序。

31. 设计十字路口交通信号灯的控制程序，要求如下：南北方向红灯亮 55 s，同时东西方向绿灯先亮 50 s，然后绿灯闪烁 3 次(亮 0.5 s，灭 0.5 s)，最后黄灯再亮 2 s；之后东西、南北两个方向的灯同时翻转，东西方向变为红灯，南北方向变为绿灯，如此循环。画出状态转移图、梯形图，写出指令程序。

第8章 直流电动机调速控制

20 世纪 90 年代前约 50 年间，直流电动机几乎是唯一能实现高性能拖动控制的电动机。然而，随着交流电动机调速系统的发展，直流电动机拖动形式不断受到挑战。但大规模集成电路技术与计算机技术的飞速发展，也使直流电动机调速系统的精度、动态性能、可靠性有了更大的提高，出现了性能更好的直流调速系统。

8.1 直流调速控制系统的基本概念

直流电动机按励磁方式可分为他励、并励、串励和复励四类，其各自运行特性不尽相同，这里主要讨论应用广泛的他励直流电动机调速系统。

8.1.1 他励直流电动机机械特性方程

依据直流电动机的工作原理，在定子磁极构成的磁场中，当直流电压施加到电动机电枢绕组上以后，电枢绕组中就有电流流过，电动机转子就在电磁转矩的作用下旋转起来，从而实现电动机的转速输出。电动机机械特性方程则构建了电枢电压 U_a、励磁电流 I_f、输出转矩 T_D 与输出转速 n 之间的函数关系，有下列方程成立

$$\begin{aligned} U_a &= E_f + I_f R_\Sigma \\ E_f &= C_e \Phi_n \\ T_D &= C_T \Phi I_f \end{aligned} \tag{8-1}$$

式中：C_e——电动机电动势常数；

C_T——电动机转矩常数；



Φ——励磁磁通；

R_Σ——电枢回路总电阻。

分析上式可得电动机的转速特性方程为

$$n = \frac{U_a}{C_e\Phi} = -\frac{R_\Sigma}{C_e C_T \Phi^2} T_D \tag{8-2}$$

当 $T_D=0$ 时，有

$$n = n_0 = \frac{U_a}{C_e\Phi} \qquad \Delta n = \frac{R_\Sigma T_D}{C_e C_T \Phi^2} \tag{8-3}$$

可见，当无外部负载时，转速仅与电枢电压成正比，此时转速称为理想空载速 n_0。当加入外部负载后，将产生一个转速降落 Δn。

8.1.2 他励直流电动机调速方式

从电动机的转速特性方程可以看出，改变电动机的电枢电压 U_a 或者励磁磁通 Φ，都可以改变电动机输出转速 n。由此产生了两种直流电动机的调速方式，一种是改变电枢电压的调压调速方式，另一种是改变励磁磁通的调磁调速方式。

1. 调压调速

从式(8-2)可以看出，当保持直流电动机励磁磁通 Φ 和电枢回路电阻 R_Σ 不变时，通过改变电枢电压 U_a 即可获得不同的转速，此方法称为调压调速。由式(8-3)可见，转速降落 Δn 与电枢电压 U_a 的改变无关，因而可得到如图 8-1 所示对应不同 U_a 的一组平行机械特性曲线。当电动机电枢允许通过的励磁电流 I_f 和励磁磁通 Φ 保持不变时，无论电动机工作在高速还是低速状态，输出转矩 T_D($T_D=C_T\Phi I_f$)为一定值，具有恒转矩变速特性，因而，调压调速也称为恒转矩调速，而电动机功率 P_D($P_D=T_D n$)则随着转速的变化而改变。

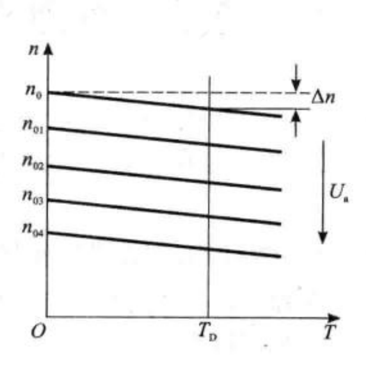


图 8-1　改变电压 U_a 机械特性

2. 调磁调速

从式(8-2)可以看出，当保持直流电动机电枢电压 U_a 不变，降低励磁磁通 Φ，可提高电动机的转速 n，此方法称为调磁调速。考虑到磁路饱和，励磁磁通 Φ 一般只能减弱而不能增强，这种向下调节方式也称为弱磁调速。改变励磁磁通

Φ 的机械特性曲线如图 8-2 所示，当保持电动机电枢允许通过的励磁电流 I_f 不变时，降低励磁磁通 Φ，转速 n 相应增大，输出转矩 T_D（$T_D = C_T\Phi I_f$）则随着 Φ 的下降而下降。因此，转速越高输出的转矩就越低，而转速越低输出的转矩也就越高。由于输出转矩 T_D 下降的同时，输出转速 n 反而上升，则电动机功率 P_D 可维持基本不变，具有了恒功率变速特性，因而，调磁调速也称为恒功率调速。

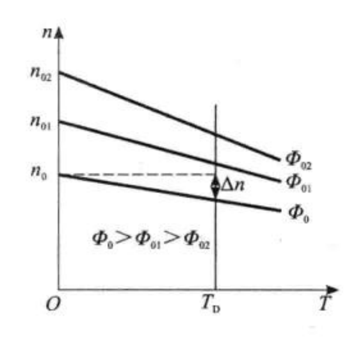


图 8-2 改变磁通 Φ 机械特性

8.1.3 他励直流电动机的起动与制动

1. 起动

直流电动机接通电源后，转速从零开始达到稳定转速的过程称为起动。起动方式主要有直接起动、降压起动和电枢串电阻起动三种。由于直流电动机的起动电流和起动转矩都很大，容易损坏换向器，因而一般的中、大功率直流电动机不能在额定电压和额定输出功率下直接起动，可采用降压起动或者电枢串电阻起动方式。

2. 制动

直流电动机有机械和电气两种制动方式。机械制动方式常采用电磁制动器，即俗称的“抱闸”停车；电气制动方式包括有能耗制动、反接制动和回馈制动。

1）能耗制动

当直流电动机处于正常运行状态时，若突然将电枢电压 U_a 降为零（即将电枢两端从电网断开），再迅速给电枢绕组串接一个附加电阻 R，则电动机转为发电机运行状态，转动部分的动能被转换成电能并消耗在电阻上。因而，能耗制动在转速比较高时，制动作用较大，随着转动部分动能的消耗，输出转速下降，制动作用也随之减小。

2）反接制动

反接制动是指将运转中的直流电动机断电后，迅速接入反向电源，输出转速在机械惯性作用下并不能立即改变，由于电流方向与电动机当前运行状态相反，从而起到制动作用。反接制动时电枢电压与反电势方向相同，制动电流很大，电枢电路中必须串接很大的制动电阻，以保证电枢电流不超过 1.5～2.5 倍的额定电流。制动结束后必须立即切断电源，以保证电动机不会反转。



3）回馈制动

回馈制动也称发电反馈制动或再生制动。对运行的电动机轴施加外力矩，且与原转矩方向相同。两者共同作用后产生制动作用，相当于电动机向电网输送电流，即回馈电能。

8.1.4 调速系统技术指标

研究直流电动机调速系统的调速性能，必须考虑调速系统的技术指标。为了对调速系统进行定量分析，常定义以下指标来评价其调速性能。

1. 静态指标

1）调速范围

调速范围是指生产机械要求电动机所提供的最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比，通常用字母 D 表示，即

$$D=\frac{n_{max}}{n_{min}} \tag{8-4}$$

n_{max}、n_{min} 通常指电动机加上额定负载时的转速值，对于正常工作时负载很轻的生产机械（如精密磨床），可考虑用实际负载下的转速进行替代。

2）静差率

调速范围主要描述了电动机的调速区间，并没有反映出不同负载对转速的影响。由于转速的变化主要由负载变化所引起，因而反映负载变化对转速的影响被定义为静差率，即调速系统在额定负载下的转速降落 Δn 与理想空载转速 n_0 之比，通常用字母 S 表示，即 $S=\Delta n/n_0$。理想空载转速 n_0 越高，静差率 S 就越小，而理想空载转速 n_0 越低，静差率 S 也就越大。

不同转速下的静差率如图 8-3 所示。图中给出了对应于电枢上两个不同外加电压的两条稳定工作特性线。两条工作特性线保持平行，当负载相同时，两种情况下的转速降落值也是相等的。图中 $n_{01}>n_{02}$，根据静差率 S 的定义，有 $S_1<S_2$，因此，调速系统只要在调速范围的最低工作转速时满足静差率的要求，则其在整个调速范围内都可以满足静差率的要求。

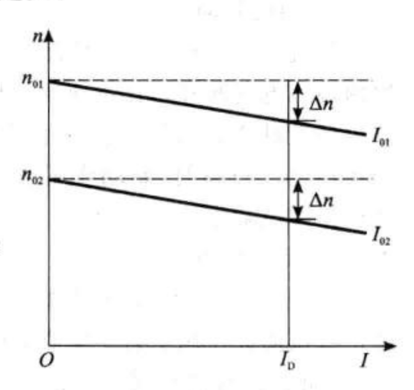


图 8-3 不同转速下静差率

分析直流调速系统的静态特性，必须综合考虑调速范围与静差率两项，单独满足其

中任一项都无法准确地表征静态特性。此外，调速系统还应在稳定工作的基础上，满足相关动态性能指标的要求。

2. 动态指标

在调速过程中，从一种稳定速度转换到另一种稳定速度运转时，由于电磁惯性和机械惯性等因素的影响，过程不可能瞬时完成，即需要经过一段过渡过程，称为动态过程。主要动态指标有跟随性能指标和抗扰性能指标。

1）跟随性能指标

在给定速度作用下，输出速度的变化可用图8-4所示的跟随性能指标来描述，其包含有上升时间、超调量和调节时间。通常希望输出速度与其稳态值之间的偏差越小越好，而且达到稳态值的时间越短越好。

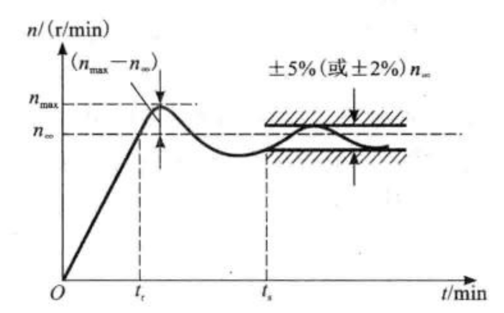


图 8-4 跟随性能指标

（1）上升时间。上升时间是指输出速度首次从零开始上升到稳态值所需的时间，记作 t_r，它反映了动态响应的快速性。对于无振荡系统，常把响应曲线的稳态值从10%上升到90%所经历的时间视作实际上升时间。

（2）超调量。在典型阶跃响应的跟随过程中，输出速度超出稳态值的最大偏差量与稳态值之比称为超调量，即 $\sigma=[(n_{max}-n_{\infty})/n_{\infty}]\times 100\%$。超调量越小，表明动态响应越平稳。

（3）调节时间。调节时间是指从给定量阶跃变化到输出量完全稳定下来的时间，记作 t_s，它反映了系统整个调节过程的快慢。对于线性系统，理论上只有当 $t\to\infty$时，系统才能真正稳定。考虑实际系统中存在的非线性影响因素，一般将阶跃响应稳态值±5%或者±2%作为允许误差带，达到并不再超出该误差带所需的最短时间视为实际调节时间。

2）抗扰性能指标

若系统受到扰动，通常希望能够在尽可能短的时间内恢复稳定，抗扰性能指标具体可用如图8-5所示的动态速度降落 Δn_{max} 和恢复时间 t_v 来衡量。

（1）动态速度降落 Δn_{max}。当系统受到扰动因素影响时，输出速度从原稳态值 n_1 经动态降落后又逐渐恢复，达到一个新的稳态值 n_2。在过渡过程中所引起的输出速度最大降落值 Δn_{max} 称为动态速度降落。

（2）恢复时间 t_v。恢复时间是指从扰动作用瞬间到输出响应恢复到允许范

围内（一般在新稳态值的±5%或±2%范围内）所经历的时间，记作 t_v。其中 n_b 称为抗扰指标中输出速度的基准值，选择 n_b 而非 n_2 作为基准值是因为动态降落本身就很小，若动态速度降落小于±5%，则用±5%n_2 来定义恢复时间就没有意义了。

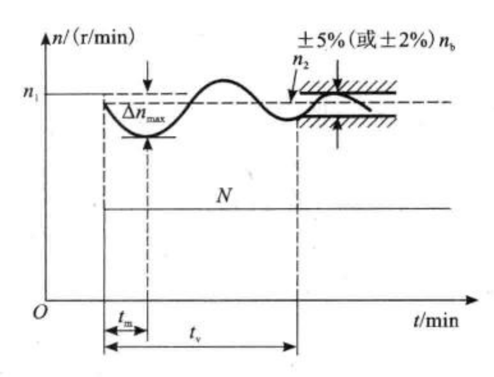


图 8-5　突加扰动时抗干扰性能指标

跟随性能指标和抗扰性能指标之间并非相互独立存在，而是存在着关联作用，通常不可能要求两项指标同时达到最优。一般情况下，调速系统动态性能指标以抗扰性能指标为主，而随动系统动态性能指标以跟随性能指标为主。

8.2　单闭环直流调速系统

任何调速系统若要实现较宽范围的速度调节，且不受外来干扰所产生的过大转速波动影响，必须要通过闭环系统来实现。单闭环直流调速系统分为有静差调速和无静差调速两类，由被调量负反馈组成的按比例控制的单闭环系统属于有静差自动调速系统，而按积分（或比例积分）控制的系统属于无静差调速系统。

8.2.1　有静差调速系统

1. 转速负反馈有静差调速系统

对于调速系统而言，输出量是转速，通过引入转速负反馈构成闭环调速系统，图 8-6 为转速负反馈单闭环晶闸管直流调速系统。图中，测速发电机 TG 与直流电动机同轴安装，由它引出的输出量为与转速成正比的负反馈电压 U_f。

令 ΔU 为给定电压 U_g 与负反馈电压 U_f 的差值，即

$$\Delta U = U_g - U_f \tag{8-5}$$

负反馈电压 U_f 与转速 n 成正比，即 $U_f=\gamma n$，其中 γ 为转速负反馈系数，则放大器输出 U_k 为

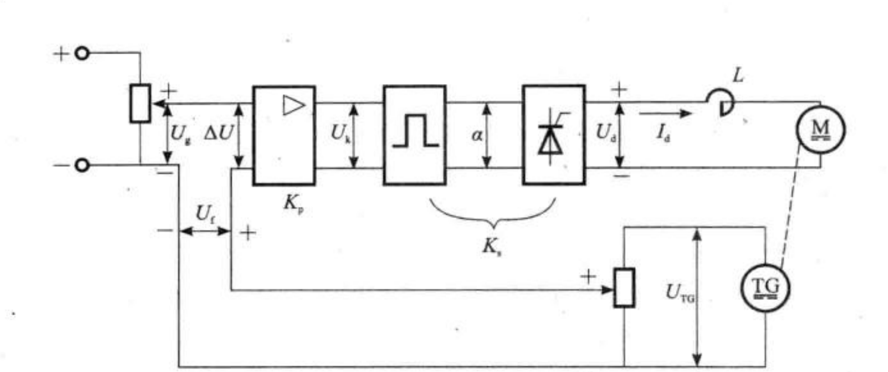


图 8-6 转速负反馈单闭环晶闸管直流调速系统

$$U_k = K_p \Delta U = K_p(U_g - U_f) = K_p(U_g - \gamma n) \tag{8-6}$$

将触发器和可控整流器视作一个整体，令其等效放大倍数为 K_s，则空载时可控整流器的输出电压 U_d（即加到直流电动机转子上的电枢电压 U_a）可表示为

$$U_d = K_s U_k = K_s K_p (U_g - \gamma n) \tag{8-7}$$

对于电动机电枢回路，若忽略晶闸管的管压降 ΔE，则有

$$U_d = C_e n + I_d R_\Sigma = K_e \Phi n + I_d R_\Sigma = K_e \Phi n + I_d (R_x + R_a) \tag{8-8}$$

式中：C_e——电动机电动势常数；

I_d——电动机工作电流；

R_Σ——电枢回路总电阻；

R_x——可控整流电源等效内阻（包括整流变压器和平波电抗器等的电阻）；

R_a——电动机电枢电阻。

综合式(8-7)和式(8-8)，可推导带转速负反馈的晶闸管有静差调速系统的机械特性方程为

$$K_s K_p (U_g - \gamma n) = C_e n + I_d R_\Sigma$$

$$\Rightarrow n = \frac{K_s K_p U_g - I_d R_\Sigma}{C_e + \gamma K_s K_p} = \frac{K_s K_p U_g - I_d R_\Sigma}{C_e\left(1 + \frac{\gamma K_s K_p}{C_e}\right)} = \frac{K_s K_p U_g}{C_e\left(1 + \frac{\gamma K_s K_p}{C_e}\right)} - \frac{I_d R_\Sigma}{C_e\left(1 + \frac{\gamma K_s K_p}{C_e}\right)}$$

$$\Rightarrow n = \frac{K_0 U_g}{C_e(1+K)} - \frac{R_\Sigma}{C_e(1+K)} I_d = n_{0f} - \Delta n_f \tag{8-9}$$

转速 n 为系统闭环理想空载转速 n_{0f} 与系统闭环转速降落 Δn_f 之差。式(8-9)中：$K_0 = K_s K_p$ 为从放大器输入端到可控整流电路输出端的电压放大倍数，$K = (\gamma / C_e) K_s K_p$ 为闭环系统的开环放大倍数。提高开环放大倍数 K 可有

效地减小静态转速降落,并扩大转速的调节范围,但 K 值过大则易引起系统不稳定。

转速负反馈有静差调速过程可描述为:在某一个规定转速下,保持给定电压 U_g 不变,令电动机空载运行($I_d \approx 0$)时的转速为 n_0。测速发电机相应电压 U_{TG}经分压器分压后,得到反馈电压 U_f,将 U_g 与 U_f 的差值 ΔU 作为放大器的输入电压,其输出电压 U_K 作为触发器的输入电压,使可控整流装置输出整流电压 U_d 供电给电动机,从而产生空载转速 n_0。当负载增加时,电动机工作电流 I_d 增大,由式(8-9)可知,电动机转速出现下降($n<n_0$),测速发电机相应电压 U_{TG}随之减小,反馈电压从 U_f 下降到 U'_f,相应偏差信号增加到 $\Delta U'=U_g-U'_f$。此时放大器输出电压上升到 U'_K,它使晶闸管整流器的控制角 α 减小,整流电压上升到 U'_d,电动机转速又回升到近似等于 n_0。在实际应用中,这种反馈系统在负载作用下转速并不能完全恢复到空载的数值,转速的偏差是必然存在的。

2. 电压负反馈与电流正反馈调速系统

转速负反馈的反馈信号直接反映为被调量的转速,虽然调速性能较好,但测速发电机结构相对比较复杂,给维护与安装带来了不便。在调速指标要求不是很高的情况下,可采用电压负反馈或电流正反馈等形式来代替转速负反馈,不仅可以简化系统的结构,还可在一定程度上降低系统的造价。

图 8-7 为带有电压负反馈的调速系统。电动机电枢两端电位器上取出的反馈电压 U_f 被加到放大器的输入端,将反馈电压 U_f 与给定电压 U_g 进行比较即构成电压负反馈闭环系统。当给定电压 U_g 为一定值时,由于干扰原因造成负载增加,电动机工作电流 I_d 随之增加,可控整流电源等效内阻 R_x 上的压降亦增加,可控整流器的输出电压 U_d 则相应减小,从而导致输出转速下降。此时反馈电压 U_f 也随之减小,使偏差电压 $\Delta U(\Delta U=U_g-U_f)$增加,可控整流器的输出电压 U_d 逐步回升,使转速又接近原值。

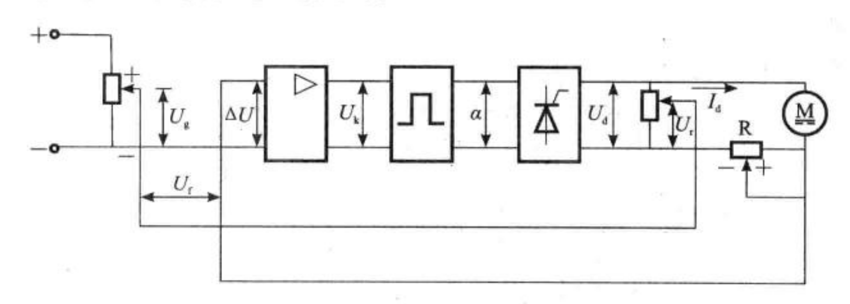


图 8-7 带有电压负反馈的调速系统

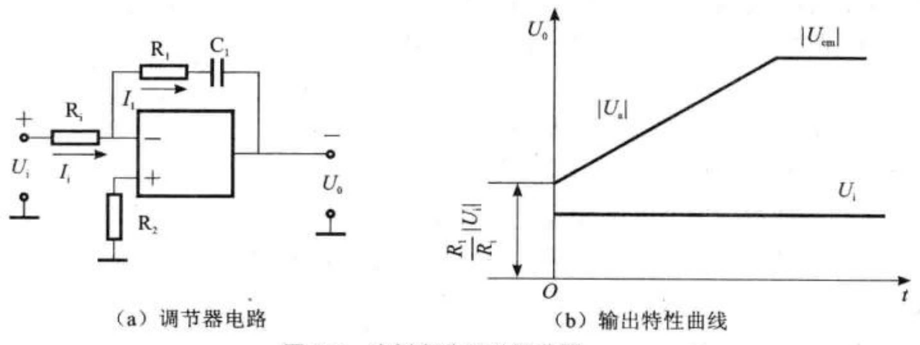
由式(8-8)可知，电枢回路总电阻 $R_{\Sigma}=R_{x}+R_{a}$。在图 8-7 中，可控整流电源等效内阻 R_{x} 处于闭环之内，电动机电枢电阻 R_{a} 处于闭环之外。这就使电动机电枢内阻 R_{a} 造成的压降并没有得到补偿，电压负反馈系统主要起到稳定电枢电压的作用，而不能像转速负反馈那样直接稳定转速。同理可知，根据电动机工作电流 I_{d} 的变化量可引入电流正反馈环节，起到稳定电动机工作电流的作用。一般情况下，可同时采用电流正反馈与电压负反馈。

8.2.2 无静差调速系统

有静差调速系统由于存在着速度静差，只能使转速接近给定值，而不能达到或完全等于给定值。所谓无静差调速系统，就是使系统内的被调量在稳态时完全等于系统的给定量，以使偏差为零，这就需要一个维持电压作为晶闸管整流装置的输入电压，以保证整流装置有正常的电压输出。根据自动控制理论，采用具有积分作用的 PI 调节器可以使系统输出误差基本消失，应用 PI 调节器构成转速负反馈即构成一个无静差调速系统。

1. 比例积分(PI)调节器

图 8-8 为比例积分(PI)调节器的结构，在运算放大器的反馈回路中，同时串入电阻和电容，就构成了 PI 调节器。



(a) 调节器电路　　(b) 输出特性曲线

图 8-8　比例积分(PI)调节器

由图可知，$U_{0}=-I_{1}R_{1}-\dfrac{1}{C_{1}}\int I_{1}\,\mathrm{d}t$，由于 $I_{1}=I_{i}=-\dfrac{U_{i}}{R_{i}}$，

故

$$U_{0}=-\frac{R_{1}}{R_{i}}U_{i}-\frac{1}{R_{i}C_{1}}\int U_{i}\,\mathrm{d}t \tag{8-10}$$

由此可见，PI 调节器的输出由两部分组成，第一部分是比例部分，第二部分是积分部分。PI 调节器输出特性曲线如图 8-8(b)所示。当突然加入输入信号

U_i 时，电容 C_1 在开始瞬间相当于短路，反馈回路中只有电阻 R_1 起作用，此时相当于比例调节器，调节无延迟，调节速度快。随着电容 C_1 被充电，进入积分环节，U_0 逐渐增长直至达到稳态值，此时 C_1 相当于开路，极大的开环放大倍数使系统基本上达到无静差。PI 调节器综合了比例和积分调节器的特点，既能获得较高的静态精度，又能具有较快的动态响应。

2. 采用 PI 调节器的无静差调速系统

将图 8-6 转速负反馈单闭环晶闸管直流调速系统中的普通放大器替换为 PI 调节器，即构成无静差调速系统。图 8-9 为负载变化时 PI 调节器对电动机速度的调节作用图。在图 8-9(a)中，假设在 t_1 时刻，电动机负载突然由 T_{L1} 增加至 T_{L2}。由于电动机轴上转矩突然失去平衡，电动机的转速将由 n_1 开始下降而产生图 8-9(b)所示的速度降落 Δn。对应图 8-6 中与转速成正比的负反馈电压 U_f 通过测速电机反馈到 PI 调节器输入端，其输出电压由比例、积分两部分组成。

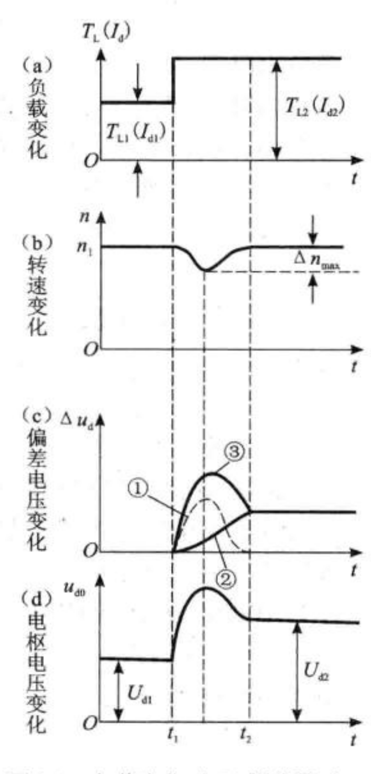


图 8-9　负载变化时 PI 调节器对电动机速度调节作用

结合前述针对图 8-6 的分析，负载增加时会使电动机输出转速降低，在 PI 调节器输入端出现 8-9(c)所示的偏差电压 ΔU_n。在比例调节作用下，可控整流输出电压增加了 ΔU_{d1}，如图 8-9(c)中曲线①所示，这个电压增量使电动机转速迅速回升。速度降落 Δn 越大，电动机转速的回升也就越快。当转速回升到原来转速 n_1 时，$\Delta n=0$，$\Delta U=0$，故 ΔU_{d1} 也等于零。而积分作用产生的电压增量 ΔU_{d2}，如图 8-9(c)中曲线②所示。ΔU_{d2} 初始增长较快，而在调节后期随着 Δn 的减小，ΔU_{d2} 的增加也减慢，直到 ΔU_n 等于零时，ΔU_{d2} 才不再继续增加，此后一直保持该值不变。

在采用 PI 调节器时，比例作用与积分作用同时起调节作用，因而两者综合作用效果如图 8-9(c)中曲线③所示。不管负载如何变化，系统都会自动调节。在调节过程的开始和中间阶段，比例调节起主要作用，它首先阻止 Δn 的继续增大，而后使转速回升。在调节过程的后期，由于 Δn 很小，比例调节作用不明显，

此时积分调节作用就上升到主要地位，依靠它来消除转速偏差 Δn，使转速回升到原值。

8.3 双闭环直流调速系统

依据反馈控制的规律，采用某个物理量的负反馈就可实现保持该量基本不变。在电动机的起动过程中，如果通过电流负反馈获得近似的恒流过程，则可加速起动过程；在电动机到达稳态转速以后，利用转速负反馈可使设备稳速运行。如何综合转速和电流两种负反馈作用，又使它们只能在不同的阶段各自起作用，双闭环调速系统提供了解决这个问题的途径。

8.3.1 转速、电流双闭环调速系统的组成

图 8-10 为转速与电流双闭环调速系统。为了实现电流和转速两种负反馈控制，系统中设置了两个调节器，分别对速度和电流进行调节，两者之间采用串级连接。将给定电压 U_g 与反馈电压 U_f 的偏差，即 $\Delta U_n = U_g - U_f$ 送入速度调节器 ASR(Automatic Speed Regulator)的输入端，速度调节器 ASR 的输出端信号 U_i 作为电流调节器 ACR(Automatic Current Regulator)的给定信号。U_i 与电流反馈信号 U_{fi} 的差值($\Delta U_i = U_i - U_{fi}$)构成电流调节器 ACR 的输入信号，其输出信号 U_k 被送至触发器以控制可控整流器，从而为电动机提供直流电压 U_d，使电动机在给定转速下运转。

从闭环反馈的结构上看，电流调节环在里面，可称为内环，转速调节环在外面，可称为外环。双闭环调速系统的一个重要目的就是获得接近理想化的起动过程，因而，有必要结合起动过程分析其动态特性。

8.3.2 转速、电流双闭环调速系统的动态特性

当双闭环调速系统突加给定电压 U_g，并由静止状态开始起动时，直流电动机的转速和电流随时间变化的波形如图 8-11 所示。在起动过程中，速度调节器 ASR 历经不饱和、饱和、退饱和三个阶段，在图中分别以Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ标记。

1. 第Ⅰ阶段($0-t_1$)

第Ⅰ阶段为强迫电流上升阶段。突加给定电压 U_g 以后，电动机由于惯性

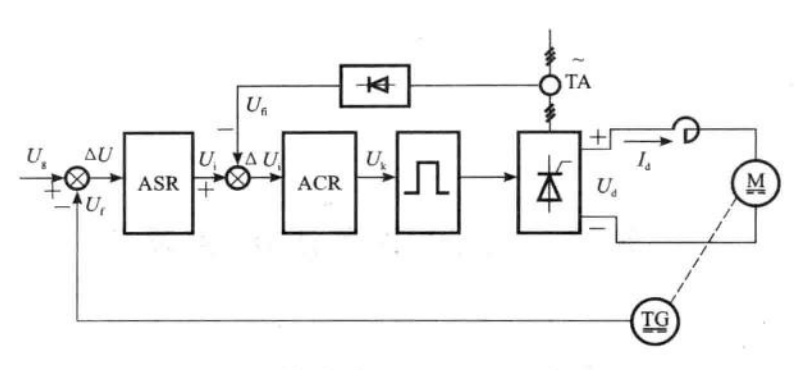


图 8-10 转速与电流双闭环调速系统

还来不及转动，则转速 $n=0$，反馈电压 $U_f=0$。此时，速度调节器 ASR 的输入很大，使电流调节器 ACR 的输出电压 U_k、可控整流器的输出电压 U_d、电动机工作电流 I_d 都迅速上升。当电动机工作电流 I_d 超过负载电流 I_L 以后，输出转速 n 从零开始上升。由于电动机惯性依旧较大，输出转速 n 及其反馈电压 U_f 增加缓慢。速度调节器 ASR 的输出因输入偏差电压（$\Delta U=U_g-U_f$）的数值较大而迅速饱和，其输出达到限幅值 U_m（$U_m=I_d\beta$，β 为电流反馈系数），强迫 I_d 继续增加，直到 $I_d=I_{dm}$（堵转电流）。此时电流反馈信号 U_{fi} 约等于限幅值 U_m，在电流调节器 ACR 的作用下，电动机工作电流 I_d 不再增长，第 I 阶段结束。

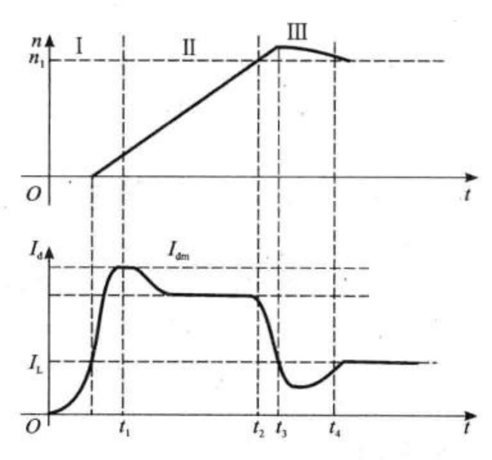


图 8-11 双闭环调速系统起动转速与电流波形

2. 第 II 阶段（t_1-t_2）

第 II 阶段为恒流升速阶段，即电动机保持最大电流作恒加速起动阶段。在这个阶段，速度调节器 ASR 的输出一直处于饱和状态，速度反馈不起作用，电流反馈使电动机工作电流维持在堵转电流 I_{dm}，因而系统的加速度恒定，转速呈线性增加。与此同时，电动机的反电势 E 也增加，构成一个线性渐增的扰动量。为了减小这个扰动量，电流调节器 ACR 输出电压 U_k 和可控整流器的输出电压 U_d 也必须按线性增长，从而保证电动机工作电流 I_d 恒定。

3. 第Ⅲ阶段(t_2-t_4)

第Ⅲ阶段为转速调节阶段,即转速超调后进入稳定的阶段。从 t_2 时刻,转速已达给定值 n_1,此时给定电压 U_g 与反馈电压 U_f 相等,速度调节器 ASR 的输入偏差电压 ΔU 为零,但输出却由于积分作用维持在限幅值 U_m。因而,电动机仍在最大电流下继续加速,导致转速超调。在转速超调以后,$n>n_1$,$U_f>U_g$,速度调节器 ASR 的输入偏差 ΔU 由正变负,并随之退出饱和状态,其输出电压 U_k 从限幅值 U_m 降下来,I_d 也迅速减小。由于 I_d 仍大于负载电流 I_L,在 t_2-t_3 时间内,输出转速 n 继续上升,直至 t_3 时刻,$I_d=I_L$,转矩平衡。电动机在负载阻力作用下减速,直至系统达到稳定状态。该阶段的特点是速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR 都不饱和,可同时起调节作用,但速度调节器 ASR 处于主导地位,它使转速迅速趋于给定值,并使系统稳定。电流调节器 ACR 的作用则是尽快跟随速度调节器 ASR 输出。进入稳定状态后,系统在大电流范围内可无静差地运行。

8.4 直流可逆调速系统

在实际生产过程中,不仅要求电动机能平滑调速,还要求电动机能够频繁切换于起动、制动、正转及反转等运行状态,能够满足这类要求的调速系统被称为可逆调速系统。

直流电动机的可逆运行,最基本的方法是改变电动机的电磁转矩方向,根据直流电动机的电磁转矩公式 $M_d=K_m\Phi I_d$,电磁转矩方向的改变可通过改变励磁磁通 Φ 或者电动机工作电流 I_d 的方向来实现。

8.4.1 电枢反接可逆调速系统

电枢反接就是按控制要求改变电枢外接直流电源的电压极性,常用的方法有三种:利用接触器进行切换的可逆线路、利用晶闸管进行切换的可逆线路及利用两组晶闸管整流器反并联的可逆线路。

1. 利用接触器进行切换的可逆线路

图 8-12 为利用接触器进行切换的可逆线路。图中只有一套晶闸管变流器,利用接触器 FKM 和 RKM 的交替通断,可改变电动机电枢电流的方向。当接



触器 FKM 闭合而 RKM 打开时，电路中 A 点为正极性电位，B 点为负极性电位，电枢电流的方向如图中实线所示，此时电动机正转；当接触器 RKM 闭合而 FKM 打开时，电路中 A 点为负极性电位，B 点为正极性电位，电枢电流的方向如图中虚线所示，此时电动机反转。

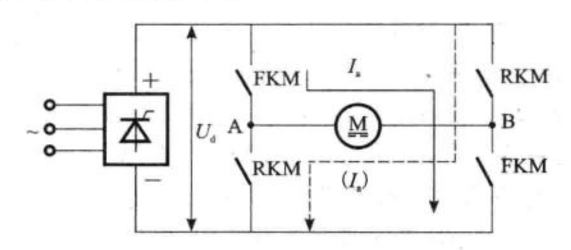


图 8-12　利用接触器进行切换的可逆线路

这种可逆线路比较简单、经济，但频繁切换时，接触器噪声较大、寿命较短。另外，当两个接触器交替开关和闭合时，大约需要 0.2～0.5 s 的时间，使切换过程有所延缓。因此，该可逆线路不适用于频繁、快速切换的可逆调速系统。

2. 利用晶闸管进行切换的可逆线路

图 8-13 为利用晶闸管进行切换的可逆线路。即将图 8-12 中的四个接触器用晶闸管替代，将接触器的有触点控制变为晶闸管的无触点控制。

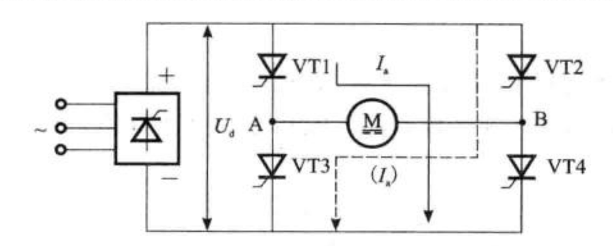


图 8-13　利用晶闸管进行切换的可逆线路

该可逆线路克服了利用接触器做通断开关的不足，但也只适用于容量较小的调速系统。

3. 利用两组晶闸管整流器反并联连接的可逆线路

图 8-14 为利用两组整流器反并联可逆线路，其中Ⅰ组为正向晶闸管整流器，Ⅱ组为反向晶闸管整流器，它们可分别为电枢回路提供不同方向的电流。当Ⅰ组整流工作时，输出的整流电压 U_{doz} 提供给电枢的电流 I_d 方向如图中实线所示；当Ⅱ组整流工作时，输出的整流电压 U_{dof} 提供给电枢的电流 I_d 方向如图中虚线所示。当 I_d 为实线所示方向时，电动机正转；当 I_d 为虚线所示方向时，

电动机反转。由于晶闸管本身反应的快速性，使电动机正、反向转速的切换也变得相当快速，从而使得该线路适用于频繁、快速切换的可逆调速系统。在两组晶闸管装置组成的可逆电路中，影响其系统安全工作的一个关键问题是环流问题。所谓环流是指不流过电动机或其他负载，而直接在两组晶闸管之间流通的短路电流。

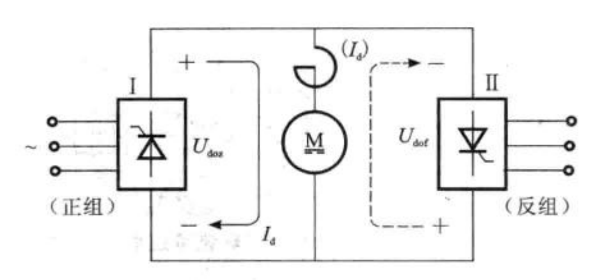


图 8-14　利用两组整流器反并联可逆线路

8.4.2　有环流可逆调速系统

在可逆系统中，环流具有两重性。一方面，环流的存在会显著加重晶闸管和变压器的负担，消耗无用功率，环流太大时甚至会导致晶闸管损坏，因此必须予以控制；另一方面，可以利用环流作为流过晶闸管的基本负载电流，即使在电动机空载时，也可使晶闸管装置工作在电流连续区，避免电流断续引起的非线性对系统静态、动态性能的影响。有环流可逆直流调速系统常见的有两种：一种是采用 $\alpha=\beta$ 工作制可逆直流调速系统，另一种是采用可控环流可逆直流调速系统。

1. $\alpha=\beta$ 工作制可逆直流调速系统

在反并联可逆连接线路中，只要设法保证一组工作于整流状态时，另一组工作于逆变状态，且使整流组的控制角 α 与逆变组的逆变角 β 在量值上相等，则整流输出电压与逆变输出电压平均值相等且极性相反，这样就很难产生直流平均环流。一般称为 $\alpha=\beta$ 工作制的配合控制，其原理如图 8-15 所示。

可逆直流调速系统采用三相全控桥式反并联可逆线路的主电路形式，设置四个均衡电抗器 LC1～LC4，另设置一个平波电抗器 L 以避免均衡电抗器流过较大的负载电流而饱和。控制线路采用典型的转速与电流双闭环系统。速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR 都设置了双向输出限幅，可限制最大动态电流、最小控制角 α_{min} 与最小逆变角 β_{min}。继电器 KF 和 KR 用来切换给定电压以满足正、反转的需要。

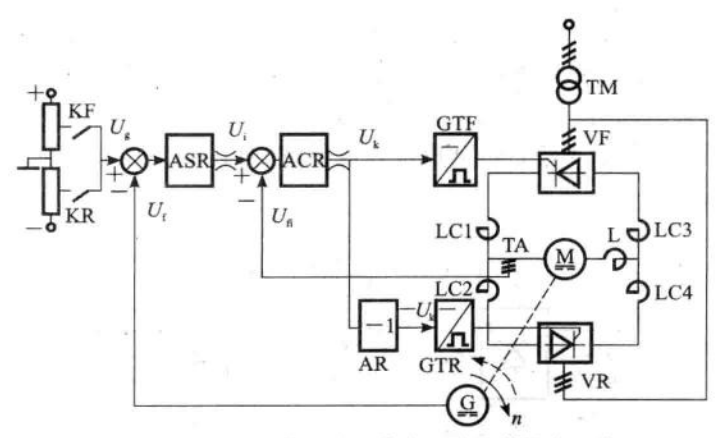


图 8-15 采用 $\alpha=\beta$ 配合工作制的有环流可逆调速系统

可逆系统的给定电压 U_g 有正负极性之分，不同极性对应电动机的不同转动方向，分别由继电器 KF 和 KR 来切换。当电动机正转时，正向继电器 KF 触点接通，U_g 为正极性，经 ASR 和 ACR 输出的移相控制信号 U_k 为正，正组触发器 GTF 输出的触发脉冲控制角 $\alpha_{GTF}<90°$，正组晶闸管整流装置 VF 处于整流状态，同时 U_k 信号经反相器 AR 使反组触发器 GTR 输出极性相反的移相控制信号 $-U_k$，输出的触发脉冲 $\alpha_{GTR}>90°(\beta_{GTR}<90°)$，且 $\alpha_{GTF}=\beta_{GTR}$，使反组晶闸管整流装置 VR 处于待逆变状态。当电动机反转时，反向继电器 KR 接通，U_g 为负极性，反组晶闸管整流装置 GTR 处于整流状态，正组晶闸管整流装置 GTF 处于待逆变状态。在 $\alpha=\beta$ 配合工作制下，电动机的电流可以很容易在正、反两个方向平滑过渡。

显然，$\alpha=\beta$ 配合工作制可逆直流调速系统的突出优点是正、反换向无死区、快速性好；缺点是在受到参数变化、元件老化及其他干扰作用时，控制角可能偏离 $\alpha=\beta$ 的关系，因此这种调速方式多用于中、小容量系统中。

2. 可控环流可逆直流调速系统

针对环流可用的有利方面，一个理想的环流变化规律应该是：在轻载时采用 $\alpha<\beta$ 的控制方式，以保证电流连续；在负载较大时采用 $\alpha>\beta$ 的控制方式，使环流减小到零。这种根据实际负载来控制环流大小和有无的系统称为可控环流可逆调速系统。

可控环流可逆调速系统原理如图 8-16 所示。主电路常采用两组晶闸管交叉连接的线路，控制线路仍为典型的转速与电流双闭环。两套电流互感器和电流调节器分别组成正、反向各自独立的电流闭环，并在正、反组电流调节器 1ACR 与 2ACR 输入端分别加上了控制环流的环节。该环节包括二极管 VD、

电容 C、电阻 R 及环流给定电压 U_e。为了使 1ACR 和 2ACR 得到极性相反的给定信号，U_i 经反相后作为 2ACR 的电流给定。当一组整流时，另一组就可用来控制环流。

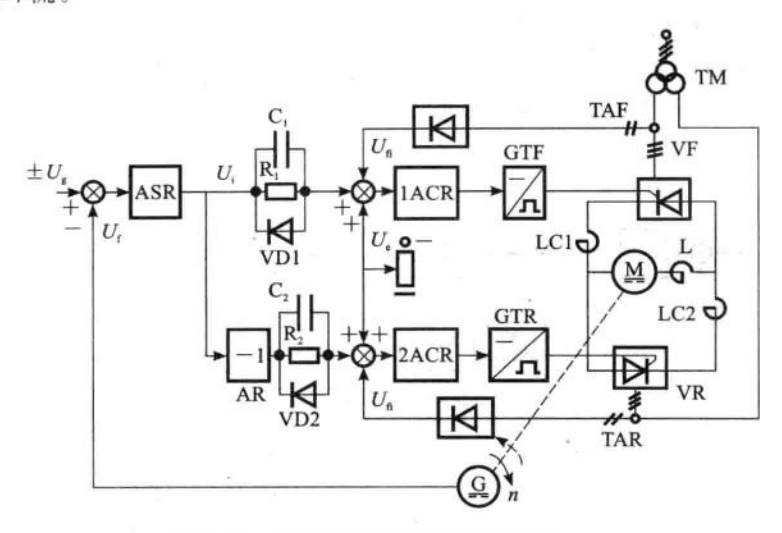


图 8-16 可控环流可逆调速系统原理

当 U_g 为正给定时，电动机正向运行，U_i 的极性为负，二极管 VD1 导通，负极性的 U_i 加在正组电流调节器 1ACR 上，使正组控制角 α_f 更小，输出电压 U_{dof} 升高，正组流过的电流 I_f 也增大；与此同时，反组的电流给定 U_i 为正极性，二极管 VD2 截止，正极性 U_i 通过与 VD2 并联的电阻 R 经衰减后加到反组的电流调节器 2ACR 上，正极性 U_i 与环流给定电压 U_e 的极性相反，其抵消了 U_e 的作用，抵消的程度取决于环流给定信号的大小。采用 PI 调节器的双闭环系统稳定工作时，电流环的给定信号 U_i 与电流反馈信号 U_{fi} 相等，且 U_i 与电枢电流 I_d 成正比。因此，当负载电流较小时，正极性的 U_i 不足以抵消负极性的 U_e，所以反组还有较小的环流电流流过；随着负载的加重，负载电流也增大，正极性 U_i 继续增大，抵消负极性 U_e 的增大程度。当负载电流增大到一定程度时，$U_i=|U_e|$，环流就完全被抑制了。这时正组流过负载电流，反组则无电流通过，与 R_2、VD2 并联的电容 C_2 则对遏制环流的过渡过程起加快作用。同理，当反向运行时，反组提供负载电流，正组控制环流。

8.4.3 无环流可逆调速系统

在容量较大的系统中，常采用既没有直流平均环流又没有瞬时脉动环流的



可逆调速系统。虽在快速性、过渡平滑性方面不如有环流可逆调速系统，但省去了限制环流的电抗器，消除了环流损耗，在大容量系统中得到了广泛应用。

无环流可逆调速系统又可分为逻辑控制无环流系统和错位控制无环流系统。图8-17为逻辑控制无环流可逆调速系统，其工作原理是：当一组晶闸管整流装置工作时，用逻辑电路封锁另一组晶闸管整流装置的触发脉冲，使其完全处于阻断状态，从根本上切断环流的通路。

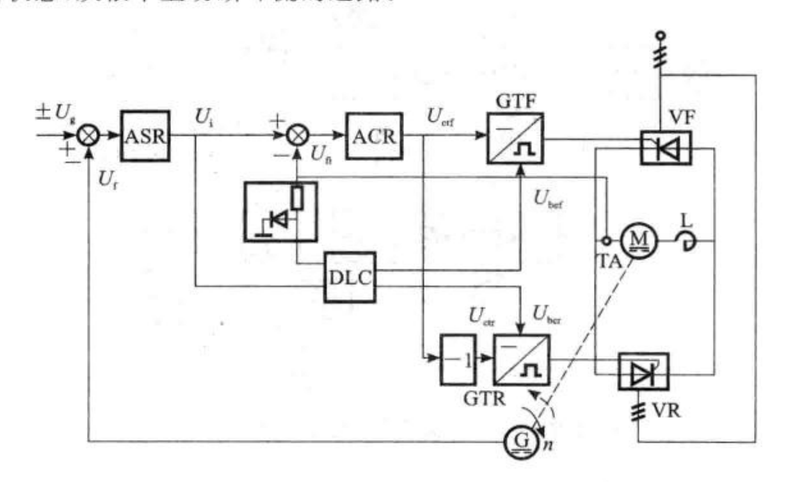


图 8-17　逻辑控制无环流可逆调速系统

图中，当 U_g 为正给定时，U_i 为负，U_{ctf} 为正，逻辑控制器 DLC 通过 U_{bef} 开放 GTF 的脉冲输出，使正组整流装置 VF 工作于整流状态，电动机正向运行。同时 DLC 通过 U_{ber} 封锁 GTR 的脉冲输出，使反组 VR 的晶闸管全部处于关断状态。当 U_g 为负给定时，U_i 为正，则 U_{ctr} 为负，逻辑控制器 DLC 通过 U_{ber} 开放 GTR 的反组脉冲输出，使反组整流装置 VR 工作于整流状态，电动机反转运行，此时，正组触发脉冲被 DLC 通过 U_{bef} 封锁。

为确保无环流，对无环流逻辑控制器有以下三点控制要求：①无环流逻辑控制器的输入信号取自电流给定信号和零电流检测信号，经逻辑判断后，控制器发出逻辑切换指令，以封锁正组而开放反组，或者封锁反组而开放正组；②发出逻辑切换指令后，先经过封锁延时封锁原导通组脉冲，再经过开放延时开放另一组脉冲；③无论何种情况，两组晶闸管决不允许同时施加触发脉冲。

逻辑无环流可逆调速系统由于没有环流存在，因而可省去限制脉动环流的电抗器，同时也避免了附加的环流损耗，整流变压器和晶闸管整流装置的容量也可以被充分利用。和有环流系统相比，因换流失败而造成的事故率大为降

低。因设置了正、反向切换过程中的延时控制，易造成电流换向死区，影响过渡过程的快速性。

错位控制无环流系统则是在一组晶闸管工作时，并不封锁另一组晶闸管整流装置的触发脉冲，而是借助于触发脉冲相位的错开来实现无环流。

8.5 数字化直流调速系统

传统的晶闸管直流调速系统，其控制回路都是采用模拟电子线路构成，晶闸管触发器多数还是采用分立元件组装成的，这就使得硬件设计复杂，安装调试困难，故障率较高。目前，采用微处理器控制直流调速系统得到了广泛应用。它不仅使直流传动控制系统由模拟量控制转入数字、模拟量混合控制或者全数字量控制，而且使直流传动控制系统向集成化、小型化、智能化方向不断发展。

图 8-18 给出了一个数字控制的双环可逆直流调速系统原理图。图中，虚框部分是采用微机实现的控制功能，包括数字触发器、数字速度调节器 ASR 和数字电流调节器 ACR。由电流互感器得到的电流反馈信号经 A/D 转换送入微机，而由光电码盘测得的转速脉冲经处理后把实际转速 D_n 也反馈到微机。用户可以通过键盘进行人机对话，发出起、停指令或修改控制参数。

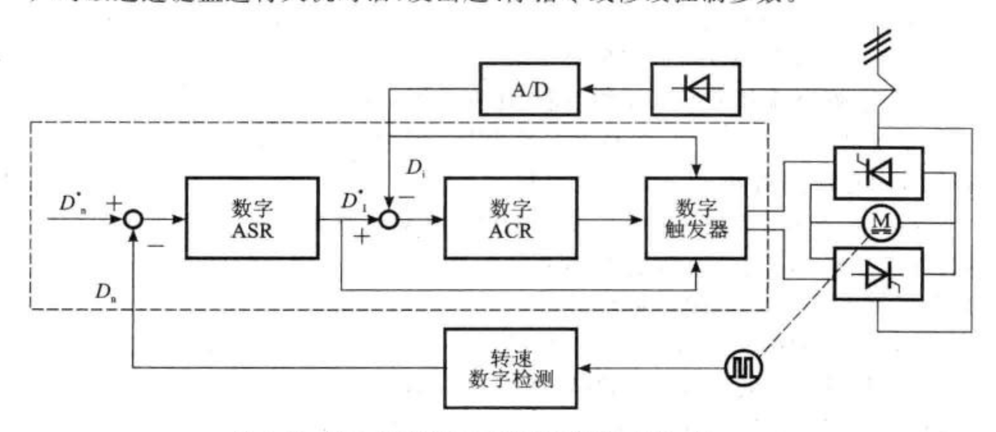


图 8-18 数字控制双环可逆直流调速系统原理

以单片机 8051 为核心的微机控制硬件电路结构如图 8-19 所示。图中，用了两片可编程并行 I/O 扩展接口芯片 8255，其中一片用于同步信号检测及触发

脉冲输出，另一片用于电流 I_1 的 A/D 转换结果输入；另外，可编程计数/定时器扩展接口 8253 也用了两片，其中一片用于测速脉冲计数，另一片用于移相控制角的定时。为了完成反馈电压和电流的模拟量到数字量的转换，采用了 A/D 转换芯片。

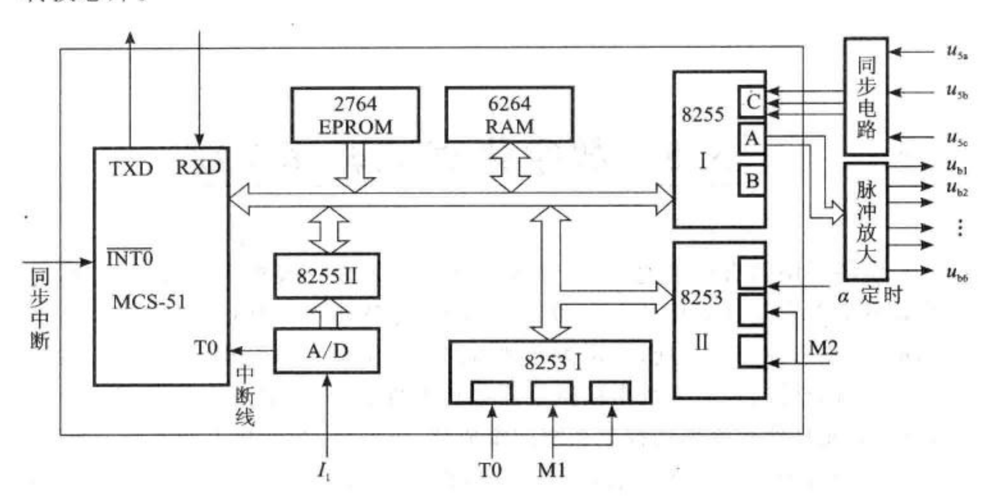


图 8-19　微机控制系统原理

与常规模拟调速系统相比，数字化直流调速系统有以下优点：

(1) 数字调速系统的控制器由可编程功能模块组成，设备的通用性强，易于实现硬件设备的标准化；

(2) 数字控制不仅可以实现数字给定和比较、数字 PI 运算、数字触发和相位控制、电枢电流和励磁电流的控制、速度控制、逻辑切换和各种保护功能，而且在系统硬件结构不变时，容易引入各种先进的控制规律，如非线性控制、最优控制和自适应控制等，以实现最佳控制；

(3) 数字传动装置控制器的结构配置和参数调整简单方便，不受环境的影响；并能存储大量的实时数据，实现系统的监控保护、故障自诊断、报警显示、波形分析等多种功能，系统可靠性高；

(4) 具有很强的通信功能。不仅可与上一级计算机通信，而且与直流传动装置之间、PLC 之间、交流传动装置之间，都可以通过局域网进行快速的数据交换，构成分布式计算机控制系统，以实现生产过程的全局自动化。

思考与练习

1. 简述他励直流电动机的调速方式及其特点。
2. 简述调速系统的静态指标与动态指标。
3. 有静差与无静差调速系统的主要区别是什么?
4. 比较单闭环与双闭环直流调速的异同点。
5. 常用直流可逆调速的方法有哪些?
6. 数字化直流调速相比常规模拟直流调速有何优点?



第9章 交流电动机调速控制

交流调速系统是采用交流电动机拖动机械设备工作并能进行电动机调速的控制系统。随着电力电子器件、微电子技术、计算机技术、电机理论以及控制理论的发展，交流调速的性能日益提高。传统上采用直流调速的轧钢、造纸、提升机械、加工机床以及机器人所用的伺服系统等，也已经用高性能交流调速系统代替直流调速系统。微型计算机和矢量变换控制技术在高性能交流传动系统中的应用也越来越广泛。

交流电动机包括同步电动机与异步电动机两大类型，不同种类的电动机交流调速技术涉及的内容也较多，本章主要讨论异步电动机（即感应电动机）交流调速的基本原理和调速方法。

9.1 交流调速的基本原理

由电工学课程知识可知，交流异步电动机转速表达式为

$$n = n_0(1-S) = \frac{60f_1}{p}(1-S) \tag{9-1}$$

式中：n_0——旋转磁场同步转速；

f_1——三相交流电源频率；

p——定子磁极对数；

S——转差率。

由式(9-1)可见，异步电动机调速主要有三种途径：①改变定子绕组磁极对数 p；②改变三相交流电源频率 f_1；③改变转差率 S。控制这些参数改变的系统被称为交流调速系统，以下是常见的几种类型。

(1) 变极调速。这种调速方式适用于专门生产的变极多速笼型感应电动机，通过绕组的不同组合连接方式，可获得二、三、四极等不同磁极对数下的速度。该

调速方式属于有级调速，只能达到大范围粗调的目的，通常与机械调速相结合应用于一些特殊场合。

(2) 转子串电阻调速。这种调速方式适用于绕线转子感应电动机，通过改变串联于转子电路中的电阻阻值，改变异步电动机的转差率 S，从而达到调速的目的。由于电阻阻值可连续变化，该调速方式在理论上能够实现无级调速。串联电阻会使功率消耗增大而降低效率，故该调速方法只适合于调速性能要求不高的场合。

(3) 串级调速。这种调速方式适用于绕线转子感应电动机，它主要是通过控制附加在转子回路中的电势来实现调速，即通过一定的电子设备将转差功率反馈到电网中加以利用。串级调速又可细分为电气串级方式、机械串级方式、低同步串级方式以及超同步串级方式等，该类调速方法在风机泵类的传动系统中应用较广泛。

(4) 调压调速。这种调速方式是先将晶闸管反并联连接，再通过调整晶闸管的触发角，改变异步电动机的端电压以实现调速，其本质上改变的是转差率。由于转差功率在转子回路中的消耗会使效率较低，该调速方法较适用于特殊转子电动机(例如，深槽电动机等高转差率电动机)，而且这种调速方法应构成转速或电压闭环，才能实际应用。

(5)变频调速。这种调速方式是通过改变三相交流电源频率以改变异步电动机的同步转速。在调速过程中，从高速到低速都可以保持有限的转差功率，具有高效率、宽范围和高精度的调速性能。目前，这类调速方式已成为交流调速发展的主流。

在选用调速系统时，一般需要综合考虑设备调速性能要求、调速系统结构、高效及经济性等因素。下面将对几个主要的调速系统进行重点的阐述与分析。

9.2 简易调速系统

9.2.1 变极调速

采用变极调速方式的电动机通常具有多种结构的绕组，通过改变绕组磁极对数即可实现调速的目的，通常有双速、三速、四速电动机，其中双速电动机的电气控制原理分析请见第四章的相关内容。

9.2.2 转子串电阻调速

对于绕线转子感应电动机，转子串电阻调速的连接方式如图 9-1 所示，它是利用改变消耗于转子外串电阻中的功率来改变转差率，从而达到调速的目的。图中，若三个接触器主触点都不闭合，可获转速 n_0；首先闭合交流接触器 KM1 主触点，电阻 R_1 被短接，可获转速 n_1；再闭合交流接触器 KM2 主触点，电阻 R_2 被短接，可获转速 n_2；最后闭合交流接触器 KM3 主触点，电阻 R_3 被短接，可获转速 n_3。显然，转速 $n_0 < n_1 < n_2 < n_3$。

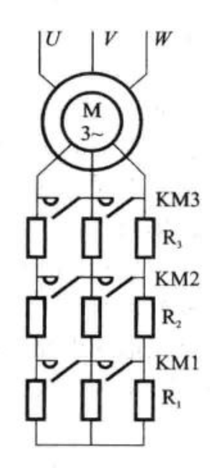


图 9-1　转子串电阻调速

转差率、转速及电磁转矩之间的关系分析如下。

已知电磁转矩 M 与转差率 S 的关系式为

$$M = \frac{3pU_1^2 \dfrac{r_2'}{S}}{2\pi f_1 \left[(r_1 + r_2'/S)^2 + (X_1 + X_{20}')^2 \right]} \tag{9-2}$$

式中：U_1——定子绕组每相端电压；

r_1——定子绕组电阻；

r_2'——折合到定子侧的转子绕组电阻；

X_1——定子漏感抗；

X_{20}'——折合到定子侧的转子漏感抗；

f_1——三相交流电源频率；

p——定子绕组磁极对数；

S——转差率。

M-S 曲线转折点 S_k 称为临界转差率，对应转矩称为最大转矩 M_m。对上式求导，并令 $\frac{dM}{dS}=0$，可得

$$S_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_{20}')^2}} \tag{9-3}$$

将 S_k 代入式(9-2)，得

$$M_m = \frac{\dfrac{3}{2} pU_1^2}{2\pi f_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_{20}')^2} \right]^2} \tag{9-4}$$

可以看出，改变折合后的转子绕组电阻 r'_2，即可改变临界转差率 S_k，而最

大转矩 M_m 保持不变。此时转速 n 的机械特性曲线如图 9-2 所示。由于串联电阻消耗功率，因而调速效率较低，这种调速方法适用于固定负载 M_{FZ} 或负载变化不大的场合。当负载较重时，小范围改变串联电阻阻值即可；当负载较轻时，则需大范围改变串联电阻阻值；当负载过轻时，则不能采用这种调速方法。

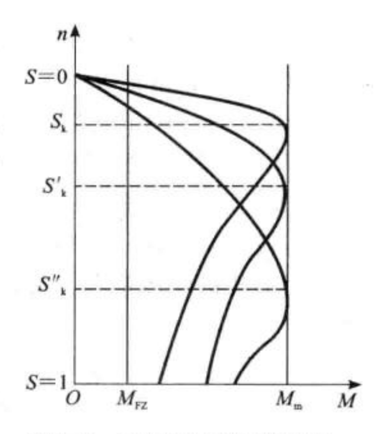


图 9-2 串电阻机械特性曲线

转子串电阻调速具有两个主要特征：一是这种调速方法的效率随调速范围的增大而降低，当通过增大转子回路电阻值以增大转差功率来降低转速时，增加的转差功率全部被转化为热能而消耗掉；二是这种调速方法只能实现有级调速，原因在于电动机转子回路附加电阻的级数有限。对于大、中容量的绕线转子异步电动机，若长期在低速下运转，不宜采用这种低效、耗能的调速方法。

9.3 串级调速

在调速性能要求较高的场合，对于绕线转子感应电动机，通常采用调速效率较高的串级调速方式。串级调速方式的特点是：将相当于转子串电阻调速中消耗的功率转变为机械功率送回到电动机轴上，或者将这部分功率送回交流电网再加以利用。

9.3.1 串级调速的原理

将三相交流异步电动机的定子绕组接电网，转子绕组经调速装置接电网，通过在转子回路中引入幅值可调的交流附加电势 E_f 来改变转差率 S 以实现调速，其原理分析如下。

当三相交流异步电动机加上交流电压以后，将会产生一个旋转磁场，并在转子绕组中产生感应电势 E_2 和感应电流 I_2，两者相互作用产生转矩 T，

$$T = C_M \Phi I_2 \cos\varphi_2 = \frac{C_M \Phi I_2 R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \tag{9-5}$$



式中：Φ——气隙中磁通量；

C_M——转矩常数；

$\cos\varphi_2$——转子电路功率因数；

R_2——转子绕组每相电阻；

X_2——转子漏感抗。

假设电动机转子不转动时产生的感应电势为 E_{20}，相应的转子漏感抗为 X_{20}，当电动机以转差率 S 旋转起来后，有 $E_2=SE_{20}$，$X_2=SX_{20}$，则转子电流 I_2 可表示为

$$I_2=\frac{E_2}{\sqrt{R_2^2+X_2^2}}=\frac{SE_{20}}{\sqrt{R_2^2+(SX_{20})^2}} \tag{9-6}$$

当电动机负载转矩为恒定值时，可以认为转子电流 I_2 也为恒定值。当转子电路中引入一个交流附加电势 E_f 与转子电势 $E_2(E_2=SE_{20})$ 串联，两者具有相同频率，而相位相同或相反，此时转子电流 I_2 可表示为

$$I_2=\frac{SE_{20}\pm E_f}{\sqrt{R_2^2+(SX_{20})^2}}\approx 常数 \tag{9-7}$$

由于电动机正常运行时 S 值很小，且 $R_2\gg SX_{20}$，因此 SX_{20} 可忽略，则

$$SE_{20}\pm E_f\approx 常数 \tag{9-8}$$

由于感应电势 E_{20} 是电动机的一个常数，那么改变交流附加电势 E_f 就可以改变转差率 S，从而实现调速。

若交流附加电势 E_f 与转子电势 SE_{20} 的相位相同，则有 $SE_{20}+E_f\approx$ 常数。当 E_f 减小时，转差率 S 增大，电动机转速降低；当 E_f 增加时，转差率 S 减小，电动机转速上升；当 E_f 达到某一数值时，转差率 S 将等于零，电动机的转速达到同步速度；当 E_f 进一步增加时，转差率 S 变为负值，此时电动机的转速将超过同步转速，称之为超同步串级调速。

若交流附加电势 E_f 与转子电势 SE_{20} 的相位相反，有 $SE_{20}-E_f\approx$ 常数。当 E_f 增加时，转差率 S 增加，电动机转速降低；当 E_f 减小时，转差率 S 也将减小，电动机转速上升；当 $E_f=0$ 时，电动机转速为最高，即为固有机械特性所确定的转速。因而，当 E_f 从 0 开始逐渐增大，电动机则从最高转速开始逐渐下降，得到低于同步转速的速度，称之为低同步串级调速。

为了简化串级调速系统，实际应用中通常将转子交流附加电势先整流为直流电压，再与一个可控的直流附加电压进行比较，通过改变直流附加电压的幅值来调节电动机的转速。该调速方法将交流可变频率的问题转化为与频率无关的直流问题，因而简化了分析与控制。通常所谓的串级调速系统，若不特别指出，一般是指低同步串级调速系统。

9.3.2 串级调速的分类

根据转差功率回馈方式的不同，串级调速系统可分为机械串级调速和电气串级调速两类。

1. 机械串级调速系统

图 9-3 为机械串级调速系统原理。三相交流异步电动机与直流电动机以同轴连接方式共同拖动负载，三相交流异步电动机的转差功率经整流变换后输送给直流电动机，后者把这部分电功率转变为机械功率反馈到负载轴上，相当于在负载上附加一个拖动转矩，从而很好地利用了转差功率。

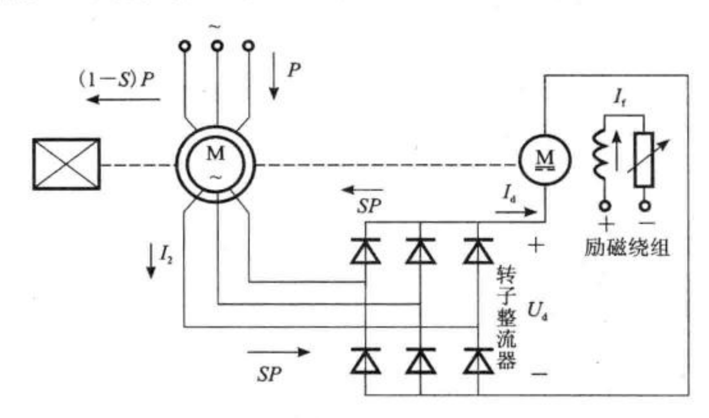


图 9-3 机械串级调速系统原理

若忽略各种内部损耗，将定子输入功率记为 P，直流电动机输入和输出的功率相等记为 SP，则三相交流异步电动机输出的机械功率为$(1-S)P$，两台电动机输出的总机械功率近似等于 P。调速时，只要改变直流电动机的励磁电流即可，从而大大提高了系统的效率。在稳定运行时，直流电动机的反电势 E_f 即可视为直流附加电压，其与转子整流器输出电压 U_d 相平衡，若增大励磁绕组电流 I_f，直流电动机的反电势 E_f 相应增大，直流电流 I_d 降低，直流电动机转速随之减小，直到达到新的平衡状态，三相交流异步电动机在较大的转差率作用下低速运行。同理，若减小励磁绕组电流 I_f，则可使三相交流异步电动机在较高转速下运行。

在机械串级调速中，定子侧的输入功率与三相交流异步电动机的转速无关，即使直流电动机和三相交流异步电动机输出的机械功率都会变化，总的输出功率也可保持不变，因而，机械串级调速系统具有恒功率的特性。由于直流



电动机在低速时不能产生足够的反电势，因此机械串级调速的应用受到一定的限制。

2. 电气串级调速系统

晶闸管电路可以将直流电转变为交流电，这种对应于整流的逆向过程称之为逆变，将直流电逆变成交流电的电路则称为逆变电路。在许多场合下，同一套晶闸管电路既可作为整流电路，也可以作为逆变电路，这种装置通常称为变流装置或变流器，也是晶闸管串级调速系统的主要组成部分。

(1) 晶闸管低同步串级调速系统

晶闸管低同步串级调速系统原理如图 9-4 所示。在串级调速中，由于较难直接实现转子回路外加电势频率与转子转动频率的同步，图中采用晶闸管逆变器控制方式获得直流附加电压 E_f。转子电势 SE_{20} 通过六个整流二极管 UR 转变为直流电以后，被有源逆变电路 UI 逆变成三相交流电压，再经过变压器 TI 将转差功率 SP 回馈到交流电网。

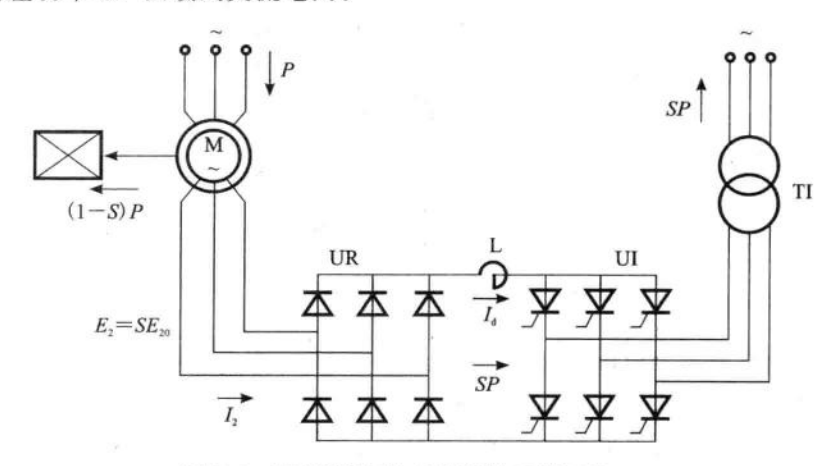


图 9-4 晶闸管低同步串级调速系统原理

改变有源逆变电路 UI 的逆变角 β，可改变直流附加电压 E_f 的幅值大小，从而改变三相异步交流电动机的转速。例如，当逆变角 β 减小时，逆变电压就增大，转子回路直流电流 I_d 减小，转子电流 I_2 也减小，电磁转矩 T 也随之减小。由于负载转矩为恒定值，当电动机减速时，转差率 S 和转子电势 SE_{20} 增大，转子回路直流电流 I_d 和转子电流 I_2 亦增大，电磁转矩 T 也随之增大，直到等于负载转矩，此时电动机将稳定在一个新的低速状态。

(2) 晶闸管超同步串级调速系统

若用六个晶闸管替换图 9-4 中转子侧的六个整流二极管 UR，则组成晶闸

管超同步串级调速电路。当转子侧采用可控变流器后，可使 UR 工作在逆变状态。UI 工作在整流状态，则可将电功率输出给电动机。此时电动机轴上的输出功率为电动机输入功率和转差功率之和，而满足此等式的转差率 S 必然为负值，即电动机可实现超同步串级调速。超同步串级调速系统可以使电动机在同步速度上进行调速，与低同步串级调速相比，其变流装置小、调速范围大、能够产生制动转矩。

综上所述，晶闸管串级调速具有调速范围宽、效率高(因转差功率可反馈至电网)、便于向大容量发展等优点。既适用于通风机类负载，也适用于恒转矩类负载。其缺点是功率因数较差，可采用电容补偿等措施使功率因数有所提高。

9.4 调压调速

根据异步电动机电磁转矩和机械特性方程可知，异步电动机转矩与定子绕组电压的平方成正比。改变定子绕组电压即可改变异步电动机的转矩及机械特性，从而实现调速，外加电压的变化随着异步电动机驱动负载的不同而改变。当异步电动机负载较轻时，即使外加电压变化很大，转速的改变也很小；当异步电动机负载较大时，如果降低供电电压，则转速快速下降，甚至可能会停转，引起电动机过热乃至烧坏。

9.4.1 异步电动机的调压特性

了解如图 9-5 所示异步电动机调压时的机械特性曲线，对于如何改变供电电压来实现均匀调速是十分有益的。当改变定子电压 U 时，最大负载 T_{max} 随之变化，而旋转磁场同步转速 n_0 和对应最大负载的静差率 S_m 则保持不变。对于某一负载 T_L，负载特性曲线 1 与不同电压($U_1>U_2>U_3$)下电动机的机械特性曲线有 a、b、c 三个交点。此种情况下改变定子电压，电动机的转速变化范围并不大。如果为风机类负载特性曲线

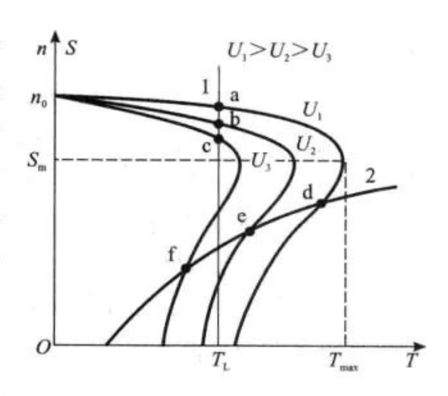


图 9-5 调压调速机械特性曲线



2，其与不同电压下电动机的机械特性曲线有 d、e、f 三个交点，调速范围增大，但当降低电压时，转矩也按电压的平方成比例减小，因而调速范围也并非很大。

由图 9-5 可见，这类系统的调速范围较小。为了在恒定负载下得到较大的调速范围，可加大转子绕组的电阻值，而随着电阻值的增大，机械特性又偏软。实际调速系统的主回路通常由自耦变压器、可控饱和电抗器或交流调压器组成。

9.4.2 晶闸管交流调压电路

晶闸管交流调压电路与晶闸管整流电路一样，也有单相与三相之分。

1. 单相交流调压电路

单相晶闸管交流调压电路的种类较多，图 9-6 为应用较为广泛的反并联晶闸管电路，下面以此电路为例分析带负载的工作情况。

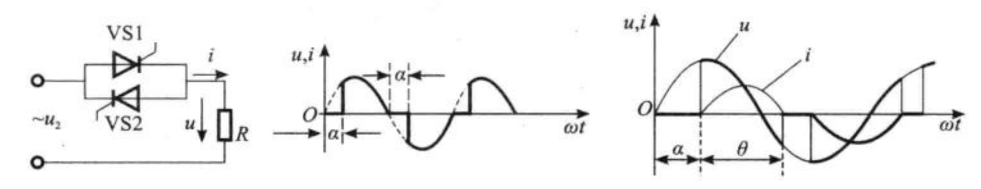


图 9-6 带负载反并联晶闸管电路及波形

图 9-6(a)为反并联晶闸管电路原理示意图，即将晶闸管反并联连接构成交流调速电路，通过调整晶闸管的触发角，改变异步电动机的端电压进行调速。

图 9-6(b)为带电阻性负载电压电流波形图。当电源电压为正半周时，在控制角为 α 时触发导通，电压过零时，VS1 则自行关断；当电源电压为负半周时，在同一控制角 α 下触发 VS2 导通。如此不断重复，便可在负载上得到正负对称的交流电压。只要改变晶闸管控制角 α 的大小，就可以改变负载上交流电压的大小。晶闸管交流调压的触发电路在原理上与晶闸管整流所用的触发电路相同，要求每周期输出的两个触发脉冲电路彼此没有公共点并且相互电气隔离。

图 9-6(c)为带电感性负载电压电流波形图。如果晶闸管调压电路带电感性负载（如异步电动机），那么电流波形与电压波形不可能像电阻性负载那样同相。由于电感电流的存在，负载中的电流波形不能突变，而是滞后于电压波形。当电压过零变为负值以后，电流经过一个延迟角才能降到零，因而晶闸管也要经过一个延迟角才能关断，延迟角的大小与控制角 α、负载功率因数角 φ 都有关系。

2. 三相交流调压电路

将三对反并联的晶闸管或者三个双向晶闸管分别接至三相负载，就构成了一个典型的三相交流调压电路。

图 9-7 为 Y 形接法。为保证输出电压对称，触发信号必须与交流电源有一致的相序和相位差。每相情况与图 9-6(b)所示原理类似，以 A 相为例，在电源电压的正半周，当控制角为 α 时触发导通 VS1，当电压过零时自行关断 VS1；在电源电压的负半周，在同一控制角 α 下触发导通 VS2。三相均按此规律不断重复，通过改变晶闸管控制角 α 的大小来改变负载上交流电压值，即可在负载上得到正负对称的交流电压。为了确保晶闸管的可靠触发，可采用控制角大于 60°的双脉冲或宽脉冲触发电路。

图 9-8 为△形接法。将三个晶闸管接成三角形，放置在星形连接负载的中点。由于晶闸管置于定子绕组之后，电网的浪涌电压可得到一定程度的削弱。由于所需晶闸管元件数量少，因而成为三相交流调压系统中常用的一种线路。由于这种调压电路是接在星形连接负载的中点上，因此要求负载的中点必须能够分得开。

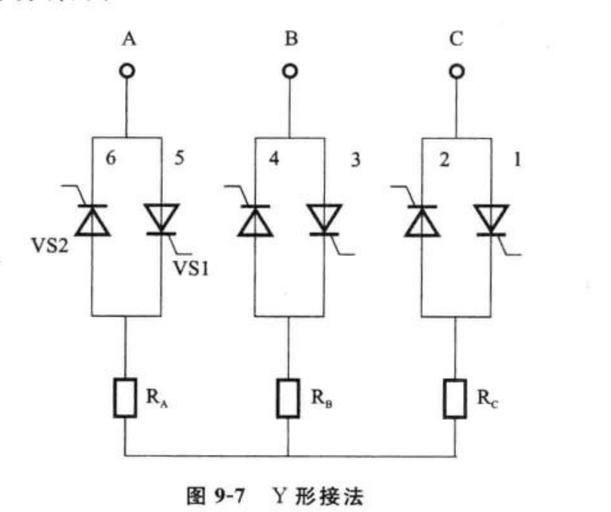


图 9-7 Y 形接法

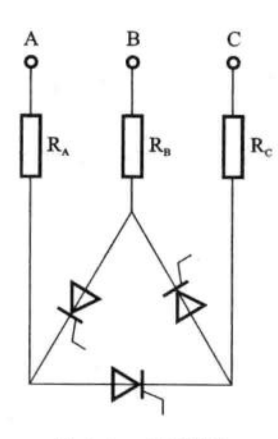


图 9-8 △形接法

3. 闭环控制的调压调速

异步电动机调压调速时，采用普通电动机调速范围很窄，而力矩电动机通过增加转子电阻可获得较宽的调速范围，但机械特性变软，负载变化时的静差率也太大，开环控制较难解决这个矛盾。因此，一般在调压调速系统里采用转速负反馈构成闭环系统，其控制系统原理如图 9-9 所示。

图 9-9 中，G 为测速发电机，GT 为晶闸管触发电路，ST 为速度调节器。当

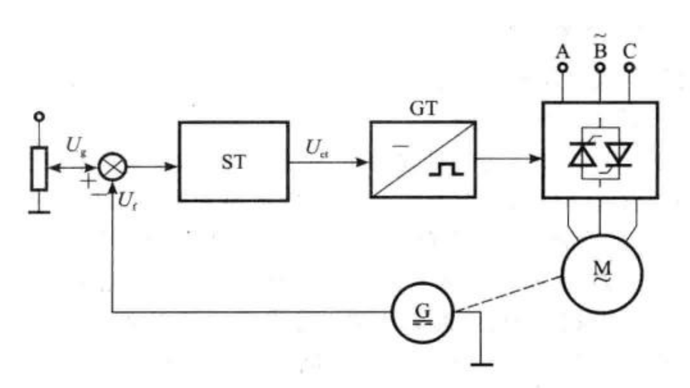


图 9-9 带转速负反馈的闭环调速系统

负载增大时，转速必然下降，由于转速负反馈的作用，可使定子绕组电压增大，从而使转速回升至近似原来设定的转速；当负载降低时，调整过程与此类同。虽然该力矩电动机的机械特性很软，但由系统放大系数决定的闭环系统静特性却可以做到很硬。若采用 PI 调节器也可以做到无静差，即改变给定信号，使静特性平行地上下移动，进而达到调速的目的。

9.4.3 异步电动机调压调速时的损耗

根据异步电动机的运行原理，当电动机定子接入三相交流电源后，转子绕组受定子绕组旋转磁场的影响而产生感应电流，两者相互作用产生转矩 T。此转矩将转子逐渐加速，直到最后稳定地运转于低于同步转速 n_0 的某一速度 n。由于旋转磁场和转子具有不同的速度，因此传到转子上的电磁功率 P_φ 记为

$$P_\varphi = \frac{Tn_0}{9550} \tag{9-9}$$

转子轴上产生的机械功率 P_m 为

$$P_m = \frac{Tn}{9550} \tag{9-10}$$

电磁功率 P_φ 与机械功率 P_m 的功率差称为转差功率

$$P_\varphi - P_m = \frac{T(n_0 - n)}{9550} = SP_\varphi \tag{9-11}$$

这个转差功率将通过转子导体发热而消耗掉，故该方法不太适合于长期工作在低速的机械设备，原因在于低速运转时的转差功率很大。若确实需要应用于这类机械设备，则可将电动机容量适当选择大一些。对于通风机类的工作机械，其负载具有转矩随转速降低而减小的特性。当向低速方向调速时，转矩亦

减小，电磁功率也减小，从而使转差功率较恒转矩负载时小很多。因此，定子调压调速的方法特别适合于通风机及泵类等机械。

9.5 变频调速

所谓变频调速，就是通过改变电动机定子供电频率以改变同步转速的调速方法，而将 50 Hz 交流电变换得到不同频率三相交流电的电子设备则称为变频器。在调速过程中，从高速到低速的整个过程中都可以保持有限的转差功率，因而具有调速范围宽、平滑性高及机械特性硬的优点。

9.5.1 变频调速的原理

三相异步电动机定子绕组每相电动势有效值 E_1 的表达式为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 K\Phi \tag{9-12}$$

式中：E_1——定子每相电动势的有效值；

f_1——三相交流电源频率；

N_1——定子绕组的有效匝数；

Φ——每极磁通。

由上式可知，定子感应电势 E_1 与磁通 Φ 有关。当异步电动机运行时，如果磁通太弱，铁芯利用则不够充分，在同样的转子电流作用下，电磁转矩减小，负载能力随之下降；如果磁通太强，则会处于过励磁状态，随着励磁电流的增大，功率因数降低，电动机的铁损增加，负载能力也将下降。因此，在变频调速的过程中，希望能控制磁通，使其保持在额定值不变，即

$$\Phi = \frac{E_1}{4.44 N_1 K f_1} = \text{常数} \tag{9-13}$$

由于 $4.44N_1K$ 为定值，故磁通 Φ 值由 E_1 和 f_1 共同决定，即 $\Phi \propto E_1/f_1$。若能够有效控制好 E_1 和 f_1，就可以达到使电动机的气隙磁通保持恒定的目的。在实际调频过程中，针对 E_1 和 f_1 的控制，存在基频（电动机电源额定频率）以上调速和基频以下调速两种情况。

1. 基频以下的恒磁通变频调速

当变频的范围在基频以下时，为了保持电动机的负载能力，需要使气隙磁



通保持不变，因而只有在降低供电频率的同时也降低感应电动势，才能够保持 E_1/f_1 = 常数，这种控制称为恒磁通变频调速。由于转矩在调速过程中近似不变，因此也属于恒转矩调速方式。

由于电动势 E_1 较难直接检测，当 E_1 和 f_1 的值较高时，可以忽略每相定子绕组的阻抗和漏磁感抗，近似认为电动机定子电压 $U_1 \approx E_1$。保持定子电压 U_1 和频率 f_1 的比值为常数，就形成恒压频比控制方式，既可保证调速过程中电动机的过载能力不变，又可同时满足磁通 Φ 基本不变的要求。当频率较低时，U_1 和 f_1 都变小，此时不能忽略定子绕组阻抗和漏磁感抗的影响，可适当提高定子电压以补偿定子电阻压降的影响，使气隙磁通大体保持不变。

2. 基频以上的弱磁变频调速

当变频的范围在基频以上时，频率由额定值向上增大，由于电动机定子电压 U_1 受额定电压 U_{1N} 的限制不能再升高，只能保持 $U_1 = U_{1N}$ 不变。当定子供电频率 f_1 升高时，电动机转速上升，而主磁通 Φ 随着 f_1 的上升而减小，电动机输出转矩下降，其调速过程相当于直流电动机弱磁调速的情况。由于电功机输出功率近似保持不变，这种调速属于恒功率调速方式。

在异步电动机变频调速系统中，为了得到更好的性能，可以将恒转矩调速与恒功率调速结合起来使用。

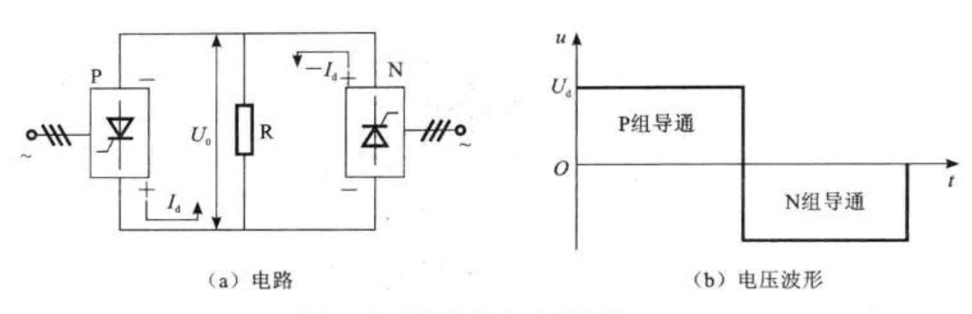
9.5.2 变频器的基本结构与工作原理

根据所采用的变频器不同，其基本结构可分为交-直-交变频和交-交变频两种。交-直-交变频是先将工频交流电源通过整流器转换成直流电源，然后再把直流电源转换成频率、电压均可控制的交流电源；交-交变频是不经过中间直流环节直接实现交流电频率的改变。

1. 交-交变频器基本结构

图 9-10 为单相方波交-交变频器的工作原理。图 9-10(a)中电路由两组反并联的变流器 P 和 N 组成，P 组和 N 组轮流向负载 R 供电。在负载上获得交流输出电压 u_0。u_0 的幅值由变流器的控制角 α 决定，u_0 的频率则由两组变流器的切换频率所决定。

图 9-11 为三相零式反并联交-交变频器的原理，它由三组结构完全相同的三相输入、单相输出变频器组成，每一组可用图 9-10(a)所示的电路图表示。根据变频器输出电压的波形，交-交变频器又可分为正弦型和方波型两种。若两组反并联三相桥式整流器的控制角 α 保持不变，当两组整流器轮流切换时，输出电压是交替变化的方波型；若在每半个周期内，设法使控制角 α 先由大变小，再



（a）电路　　　　（b）电压波形

图 9-10　单相方波交-交变频器

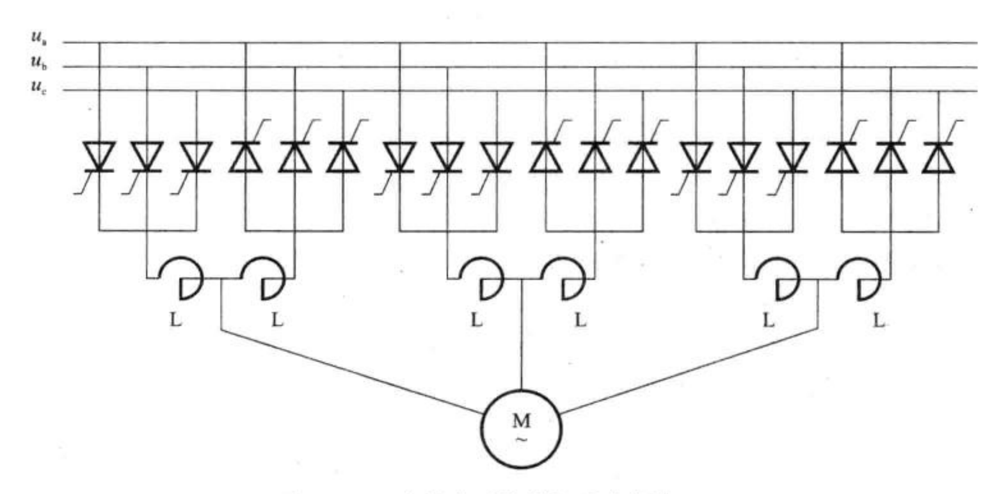


图 9-11　三相零式反并联交-交变频器

由小变大，则输出电压是按正弦规律变化的正弦型。

交-交变频器由于只进行一次能量变换，故效率较高。由于输出波形是由电源波形整流以后得到，因而输出频率不可能高于电网频率，过多开关元件的应用也使输出电压最高频率仅为电源频率的 1/2～1/3，从而使交-交变频器主要用于低频中、大功率的调速系统。

2. 交-直-交变频器基本结构

三相交-直-交变频器基本结构如图 9-12 所示，它由整流器、中间直流环节、逆变器以及控制电路组成。

（1）整流器。整流器的作用是将三相交流电变为直流电。在 PAM 方式中，用晶闸管元件构成可控整流器；在 PWM 方式中，用二极管元件构成不可控整流器。

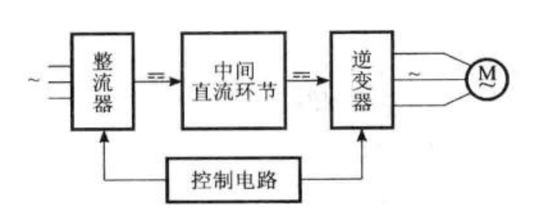


图 9-12　三相交-直-交变频器基本结构

(2) 中间直流环节。中间直流环节将整流器输出的交流成分滤除掉，获得纯直流电压提供给逆变器。变频调速系统中变频器的实际负载是异步电动机，其功率因数往往滞后，因而在直流环节和负载之间必须设置储能元件，以缓冲无功能量。

(3) 逆变器。逆变器通过控制电路，有规律地控制逆变器中开关器件的通与断，以得到频率可变的三相交流电压输出，并驱动负载电动机转动。在 PWM 方式中，逆变器还要完成变压的任务。逆变器使用的功率元件除普通晶闸管(SCR)外，还有控制门极可关断的晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)和功率场效应管(P-MOSFET)等。

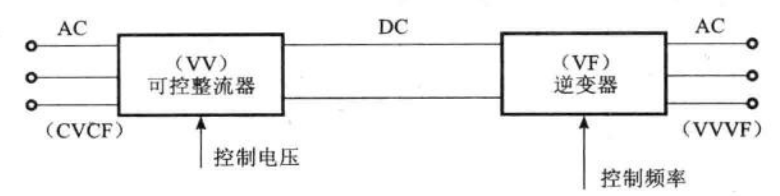
(4) 控制电路。控制电路完成对逆变器中各开关器件的通、断控制，对整流器的电压控制以及完成各种保护功能。变频器的控制电路常由运算电路、检测电路、驱动电路、控制信号的输入/输出电路等构成。目前的变频器一般采用微处理器控制，高性能的变频器已经采用数字信号处理器(DSP)进行全数字控制。

3. 交-直-交变频器分类

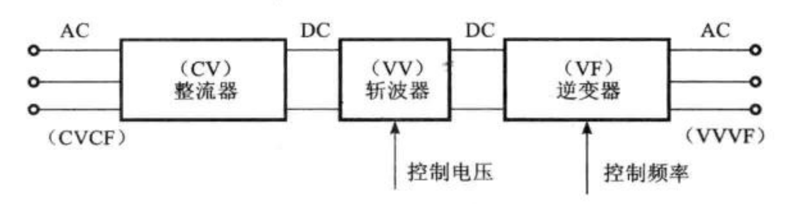
根据内部结构及变压变频控制方式的不同，变频器的结构分类如图 9-13 所示。图 9-13(a)中整流器采用晶闸管三相桥式可控整流电路，通过调整控制角 α，可将恒压恒频的交流电压转换为幅值可调的直流电压，再经过逆变器实现变频。图 9-13(b)中整流器采用不可控的二极管桥式整流电路，输出定值直流电压，经斩波器脉宽调压后，再由逆变器实现变频。图 9-13(c)中整流器仍采用不可控的二极管桥式整流电路，输出定值直流电压，依据 PWM 脉宽调制原理由逆变器同时完成调压和调频。

根据中间环节器件的不同，变频器可分成电压型变频器和电流型变频器两大类。电压型的直流滤波元件为电容，其并接于整流桥的输出端，直流环节呈低阻抗性质，相当于恒压源。电流型的直流滤波元件为高阻抗电感，其串联于整流桥和逆变桥间的直流电路中，直流环节呈高阻抗性质，相当于恒流源。只有协调这两个桥的控制电路，才能实现电压与频率之比约等于常数的变频调

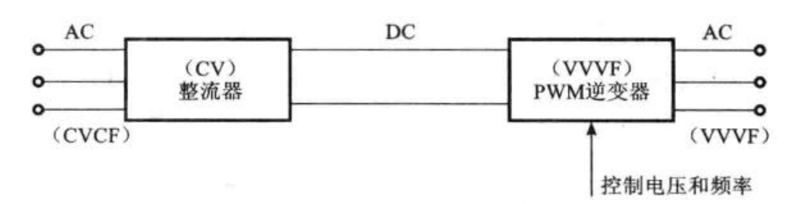
速。电压型变频器又可分为脉冲幅值调制 PAM(Pulse Amplitude Modulation)方式和脉冲宽度调制 PWM(Pulse Width Modulation)方式。



(a) 可控整流器变压、逆变器变频



(b) 不可控整流器整流、斩波器变压、逆变器变频



(c) 不可控整流器整流、PWM逆变器变压变频

图 9-13 变频器结构

9.5.3 PAM 方式

PAM 脉冲幅值调制是指按一定规律改变脉冲列的脉冲幅度,以调节输出量值和波形的一种调制方式。它将变压(VV)和变频(VF)分开完成,可控整流电路输出可调的直流电压,再经逆变器逆变后输出频率可调的交流电压。

图 9-14 为 PAM 调制主回路的原理图。晶闸管 V1～V6 组成全控桥式整流电路,可获得直流电压 U_d,电容 C 起滤波作用。可关断晶闸管 VT1～VT6 与二极管 VD1～VD6 组成逆变器,其中 VD1～VD6 主要完成电路过渡过程中的续流电路通路作用,R_1、R_2 等值的目的是取得 U_d 的中间电位点 O。

PAM 调制方式可分为 120°导通和 180°导通两种方式。以 120°导通为例,PAM 调制方式如图 9-15 所示,图中每个可关断晶闸管的导通方式为 120°。对

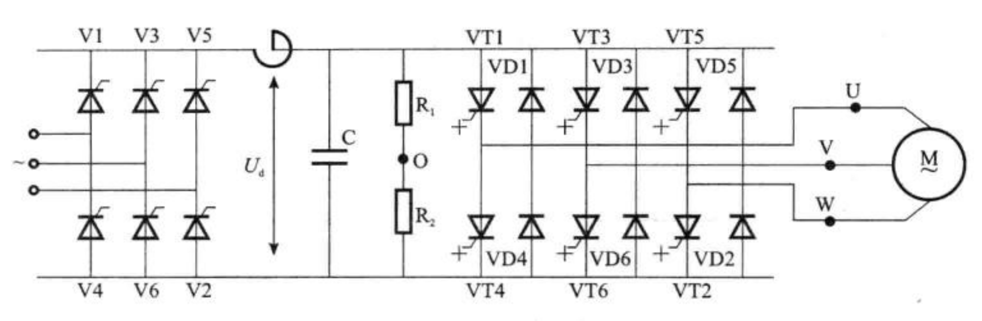


图 9-14　PAM 调制主回路原理

于图 9-14 中 VT1 和 VT4 组成的 U 型桥臂而言，VT1 先导通 120°，隔 60°后使 VT4 导通 120°，再隔 60°后又使 VT1 导通 120°，以此方式周而复始工作，可得 U、O 两点间的电压波形如图 9-15(a)所示。另两个桥臂的工作方式也与此相同，只是导通时间各相差 120°，V、O 两点和 W、O 两点间电压波形如图 9-15(b)、(c)所示。相应 U 与 V 两点、V 与 W 两点、W 与 U 两点间的电压波形如图 9-15(d)、(e)、(f)所示。通过控制可关断晶闸管 VT1～VT6 的导通频率可获得不同同步转速的旋转磁场，从而达到变频调速的目的。而通过控制晶闸管 V1～V6 的导通角可获得不同幅值的直流电压 U_d，进而控制输出三相交流电压的幅值。

PAM 方式在大容量变频器中有着广泛的应用，其优点是对功率器件的要求不高，每个逆变周期内开关次数少，电路也相对简单，较易实现大功率变频。PAM 方式中逆变器输出的交流电压只能为方波(其幅值由可控整流器调节)，进而产生谐波影响，造成电动机在低频区出现转矩脉动的问题。为改变输出波形不理想的状况，目前大多数变频器都采用 PWM 脉宽调制技术。

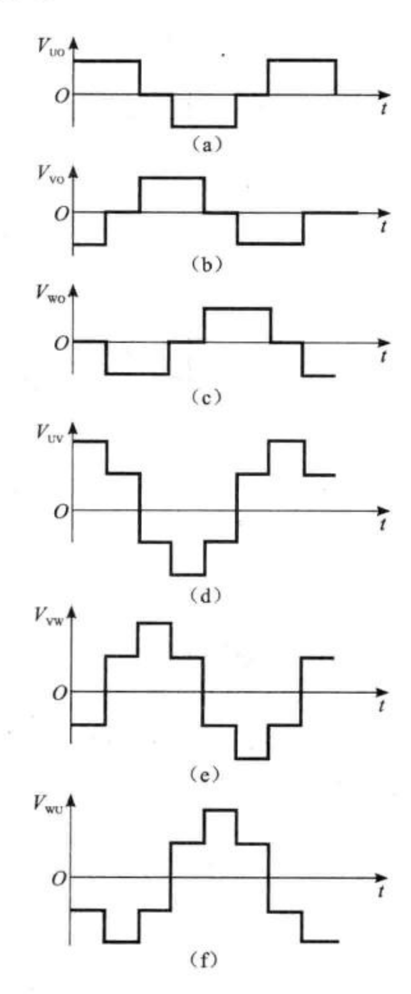


图 9-15　PAM 调制方式

9.5.4 PWM方式

PWM脉冲宽度调制是指按一定规律改变输出方波的占空比，以改变输出电压的一种调制方式。它使用不可控整流电路替换PAM方式中的可控整流电路，以输出恒定的直流电压，其变压(VV)和变频(VF)均由逆变器完成。PWM脉宽调制的方式较多，目前应用较普遍的是占空比按正弦规律变化的SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation)调制方式。

1. 脉宽调制的方法

脉宽调制的方法很多，从载波信号和调制信号的波形来分，有等脉宽调制和正弦脉宽调制两种；从载波信号和调制信号频率关系分，有同步和异步调制方式；从载波信号和调制信号的极性分，有单极性调制和双极性调制两种。

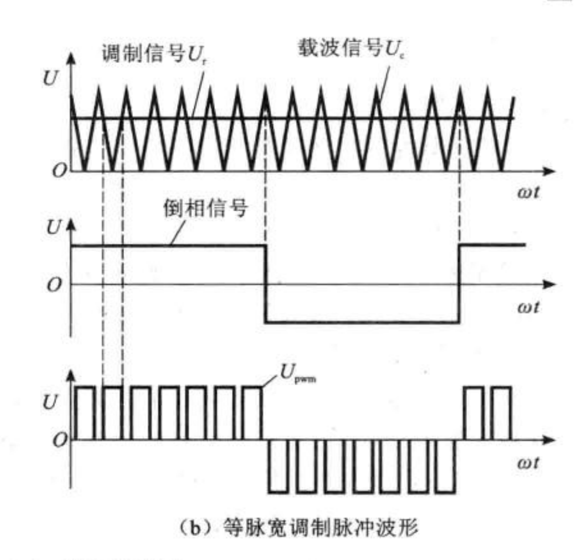
1) 等脉宽调制和正弦脉宽调制

如图9-16所示，等脉宽调制就是把电压型逆变器180°导通的触发方波分割成若干个脉冲，即图9-16(b)中的U_{pwm}，此时该U_{pwm}触发脉冲信号往往是由图9-16(a)中等腰三角波(载波信号)U_c与直流电压(调制信号)U_r相比较产生的，等脉宽调制意指U_{pwm}的脉冲宽度相等。当保持载波信号U_c幅值不变时，通过改变调制信号U_r的大小，U_{pwm}的脉冲宽度即随之改变，从而实现对逆变器输出电压大小的调整。对于单相逆变器，则通过倒相信号，得到负半周的触发脉冲。正半周的触发脉冲用于触发一对桥臂开关管导通，在负载上得到正向电压；负半周的触发脉冲用于触发另一对桥臂开关管的导通，在负载上得到负向电压。通过改变倒相信号的频率，即可改变逆变器输出电压的频率。

由于PWM逆变器输出电压为PWM波，不是方波，因而减少了低次谐波，解决了电动机在低频区的转矩脉动问题。但等脉宽调制在输出电压中含有较大的谐波成分，而正弦脉宽调制正是为了克服该缺点而发展起来的。

正弦脉宽调制是以正弦波作为逆变器输出的期望波形，它的载波信号U_c仍是等腰三角波，但三角波的频率比期望波的频率高很多，而调制信号U_r为图9-17所示的频率与期望波相同的正弦波。通过载波与调制波的比较，可获得在正弦调制波的半个周期内呈两边窄、中间宽的一系列等幅不等宽的矩形波。给出正弦波频率、幅值和半个周期内的脉冲数，PWM波形各脉冲的宽度和间隔就可以准确计算出来。按照计算结果控制电路中各开关器件的通断，就可以得到所需要的PWM波形。

在逆变器输出波形的半个周期内，逆变器同一桥臂上一个元件处于开通状态，另一个元件始终处于截止状态。对于单相逆变器，为了使逆变器输出一个



（a）比较器

（b）等脉宽调制脉冲波形

图 9-16　等脉宽调制

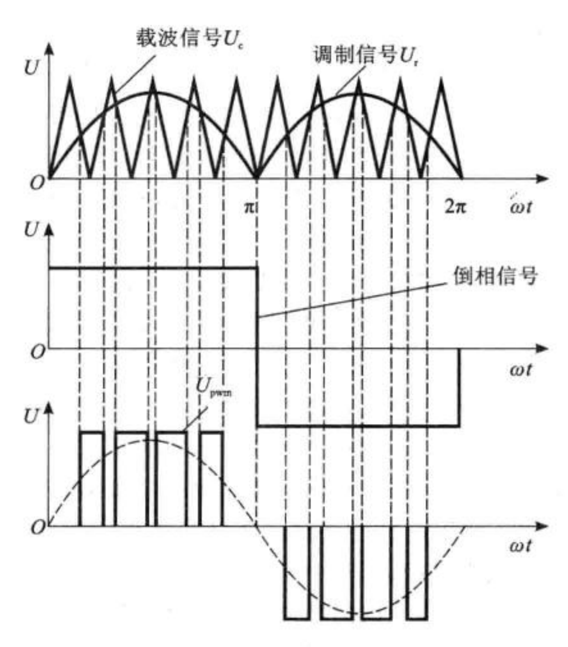


图 9-17　正弦脉宽调制

交变电压，必须在一个周期内的正负半周使上下桥臂分别交替工作，所以在负半周时，可以利用倒相信号，得到负半周的触发脉冲。改变正弦调制波的幅值，

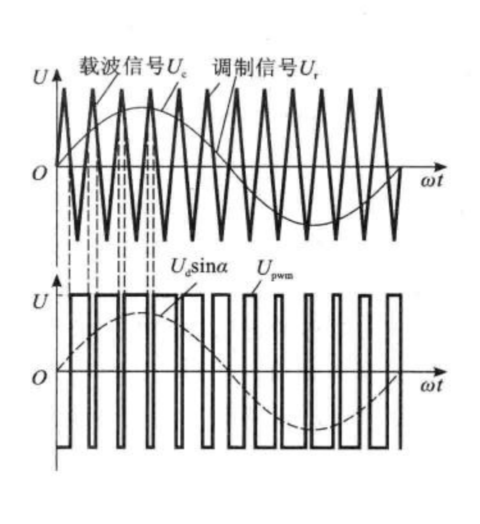
则可改变 U_{pwm} 调制脉冲宽度，就可改变逆变器正弦输出电压的幅值；改变正弦调制波的频率，即可改变逆变器桥臂导通的切换频率，从而改变输出电压的频率。调制比为 $M=U_r/U_c$，其中 U_r 为正弦调制波的幅值，U_c 为三角载波的幅值。M 一般在 0～1 之间变化，取最大值为0.8～0.9。

正弦脉宽调制具有电源侧功率因数高、电机侧谐波成分少、调速范围宽及响应快的特点。

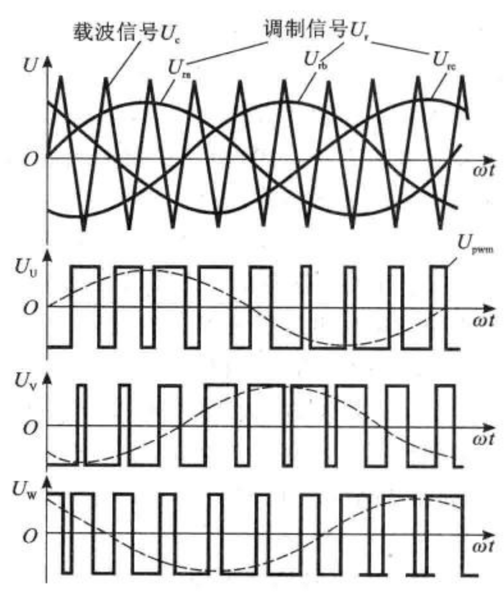
2）单极性调制和双极性调制

单极性正弦脉宽调制原理可参考图 9-17，在调制过程中，保持载波信号 U_c 和调制信号 U_r 的极性不变。

图 9-18 所示为双极性三相正弦脉宽调制原理，在调制过程中，载波信号和调制信号的极性不断交替改变，即在正弦调制波半个周期内，三角载波在正负极性之间连续变化，SPWM 波也是在正负之间变化。其调制方式与单极性正弦波脉宽调制方式相同，只是在一个周期的正负半周内，同一桥臂的上、下两个开关元件处于一通一断的互补工作状态，因而在每半个周期内便可得到交变的正弦波电压输出。



（a）双极性单相波形



（b）双极性三相波形

图 9-18　双极性三相正弦脉宽调制



3）同步调制与异步调制

载波频率 f_c 与调制频率 f_r 之比称为调制比 N，即 $N=f_c/f_r$，在调制过程中可采用不同的调制比。

同步调制就是载波信号和调制信号的频率成比例改变（一般取 N 为3的整数倍），这样调制脉冲波在任何频率情况下，可保持输出波形的三相之间的对称，因此输出只有奇次谐波，没有偶次谐波。低频时，N 值会显得过小，使谐波含量变大，转矩波动加大。因此，可采用分段同步调制方式，即将调制过程分成几个同步段调制，随着逆变器输出电压频率的降低，分段增加每周输出脉冲数。这样既克服了同步调制中低频 N 值过小的缺点，又具有同步调制三相平衡的优点。

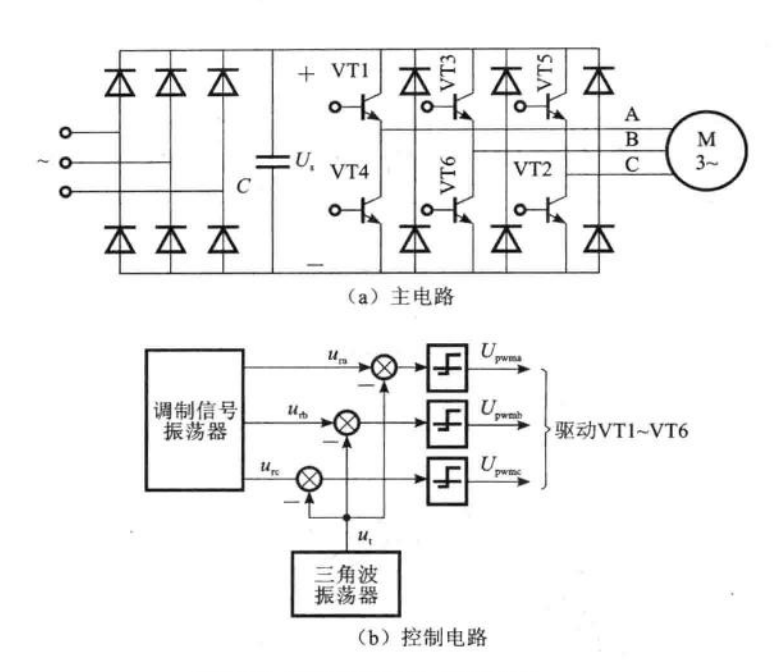
异步调制是在改变载波频率 f_c 的同时，调制频率 f_r 的值不变。由于该方式调制脉冲正、负半周脉冲数和相位不是随时对称，因此输出电压中将会出现偶次谐波，但每周的脉冲数将随着逆变器输出电压频率的降低而增加，有利于改善低频输出特性。

2. SPWM 电路构成

SPWM 正弦脉冲宽度调制是将一个正弦波分成 N 个等幅不等宽的方波脉冲，每个方波的宽度与所对应时刻正弦波的幅值成正比，从而产生与正弦波等效的等幅不等宽的方波脉冲，达到真正三相正弦交流电压输出的目的。对比其他变频调速方式，SPWM 方式具有电源侧功率因数高、电动机侧谐波成分少、调速范围宽及响应快等特点。

图 9-19 为 SPWM 变频电路示意图。在图 9-19(a)所示主电路中，逆变器的6个功率开关器件各由一个续流二极管反并联连接构成，6个二极管组成的整流电路的输出电压经电容 C 滤波后，向逆变器提供恒值直流电压 U_s。在图9-19(b)所示控制电路中，调制信号振荡器产生一组三相对称的正弦调制电压信号 u_{ra}、u_{rb}、u_{rc}，其频率、幅值决定逆变器输出电压的频率与幅值。三角波振荡器发出频率比正弦波高出许多的三角波共用信号，分别与正弦调制电压信号 u_{ra}、u_{rb}、u_{rc} 比较后，产生 SPWM 脉冲序列波 U_{pwma}、U_{pwmb}、U_{pwmc}，作为逆变器功率开关器件的驱动控制信号。

SPWM 信号通常可用分立元件、专用集成电路、微型计算机等产生。分立元件是指采用振荡器分别产生正弦波和三角波信号，通过比较器直接进行比较，该电路控制精度较难保证，可靠性差，后来出现了脉宽调制专用集成电路芯片。若由微型计算机输出数字量正弦波与三角波信号，经数模转换得到模拟量正弦波与三角波信号，再进行比较，则比专用芯片灵活且具有自诊断能力，成本



(a) 主电路

(b) 控制电路

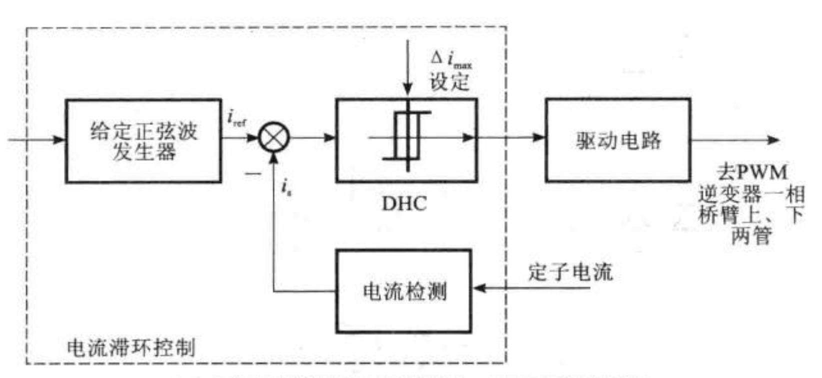
图 9-19 SPWM 变频电路示意图

也相对较高。

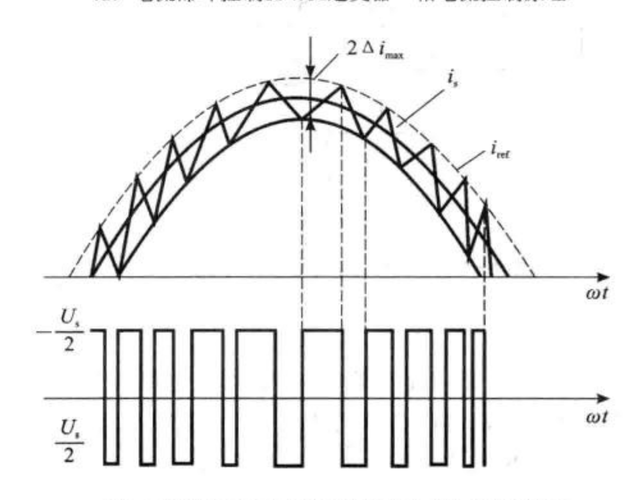
在将 SPWM 应用于交流调速系统时，逆变器主电路开关器件的开关能力、主电路结构及其换流能力等均直接影响调制效果，其中开关频率的影响较为关键。从电动机调速的角度出发，当然是开关频率越高越好，但开关频率的提高必然会导致开关管功率损耗的增加，功率损耗反过来又限制了逆变器每秒的脉冲数。

前述 SPWM 逆变器均为电压源型，即中间直流环节是恒压源，电流的大小取决于负载电路。如果负载出现低阻抗或短路的情况，所产生的严重冲击电流会损坏功率晶体管。图 9-20 为一个高开关频率的电流滞环控制 SPWM 逆变器工作原理，它将逆变器由电压源型改为电流源型。

图 9-20(a)为逆变器一相电流控制原理图，由控制电路或微型计算机产生给定频率和幅值的给定电流 i_{ref}，实际相电流 i_s 与给定电流 i_{ref} 的偏差经过具有滞环特性的高增益放大器放大，控制逆变器对应该相上下两个桥臂功率晶体管的通断。图 9-20(b)为逆变器输出电流与电压波形。令 Δi_{max} 为设定的最大电流偏差，则滞环比较器的环宽为 $2\Delta i_{max}$。当 $|i_s - i_{ref}| \geqslant \Delta i_{max}$ 时，滞环比较器的输出使该相上桥臂的功率晶体管关断，下桥臂功率晶体管在经过保护延时后导



（a）电流滞环控制SPWM逆变器一相电流控制原理



（b）电流滞环控制时逆变器输出电流与电压波形

图 9-20　高开关频率电流滞环控制 SPWM 逆变器工作原理

通，该相输出电压由 $+U_s/2$ 切换到 $-U_s/2$，电流开始下降；当 $|i_s-i_{ref}|<\Delta i_{max}$ 时，滞环比较器的输出使该相下桥臂功率晶体管关断，上桥臂功率晶体管在经过保护延时后导通，该相输出电压由 $+U_s/2$ 切换到 $-U_s/2$，电流再次上升。通过上下桥臂两个功率晶体管的反复通断，迫使实际相电流 i_s 不断跟踪给定电流 i_{ref} 的波形，仅在允许偏差范围内稍有波动。实际的电流变化过程受到电动机感应电动势、绕组阻抗和续流二极管等因素的制约。若忽略绕组电阻，电流变化率可表示为：

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=\frac{0.5U_s-E_{gm}\sin\omega_1 t}{L_1} \tag{9-14}$$

式中：$E_{gm}\sin\omega_1 t$——正弦变化的电动势；

L_1——等效漏感；

U_s——电源电压。

虽然电流滞环控制逆变器的输出电压仍是脉冲式，但已非原有意义的正弦脉宽调制。之所以仍称作 SPWM 方式，是因为给定电流 i_{ref} 仍是正弦波，实际相电流 i_s 被限制在正弦波形周围脉动，基本上也是正弦波。在调速时，只须改变给定电流 i_{ref} 的频率，无须调节逆变器的电压。

思考与练习

1. 三相异步电动机转速表达式是什么？改变哪些参数可以调整转速？
2. 简述三相异步电动机的调速方法，并比较各种调速方法的优缺点？
3. 如何实现变极调速，变极调速的特点是什么？
4. 简述串级调速的特点和应用场合。
5. 简述调压调速的工作原理。
6. 简述变频调速的原理及主要调速方法。
7. 何谓交-直-交变频器？何谓交-交变频器？它们各有什么特点？
8. 简述 PAM 和 PWM 方式的异同点。
9. 简述 SPWM 波形生成的方法。

附录　常用电气元件图形符号、文字符号一览表

类别	名称	图形符号	文字符号	类别	名称	图形符号	文字符号
开关	负荷开关		QL	位置开关	常开触头		SQ
	低压断路器		QF		常闭触头		SQ
	三极隔离开关		QS	按钮	一般符号		SB
	选择开关常开触点		SA		常开按钮		SB
	选择开关常闭触点		SA		常闭按钮		SB
	三极选择开关		SA		急停按钮		SB

续表

类别	名称	图形符号	文字符号	类别	名称	图形符号	文字符号
接触器	线圈操作器件		KM	热继电器	热元件		FR
	常开主触头		KM		常闭触头		FR
	常开辅助触头		KM	中间继电器	线圈		KA
	常闭辅助触头		KM		常开触头		KA
时间继电器	通电延时（缓吸）线圈		KT		常闭触头		KA
	断电延时（缓放）线圈		KT	电流继电器	过电流线圈	$I>$	KI
	瞬时闭合的常开触头		KT		欠电流线圈	$I<$	KI
	瞬时断开的常闭触头		KT		常开触头		KI
	通电延时闭合的常开触头		KT		常闭触头		KI

续表

类别	名称	图形符号	文字符号	类别	名称	图形符号	文字符号
时间继电器	通电延时断开的常闭触头		KT	电压继电器	过电压线圈	U>	KV
	断电延时闭合的常闭触头		KT		欠电压线圈	U<	KV
	断电延时断开的常开触头		KT		常开触头		KV
电磁操作器	电磁铁的一般符号		YA		常闭触头		KV
	电磁离合器		YC	电动机	三相笼型异步电动机	M 3~	M
	电磁制动器		YB		三相绕线转子异步电动机	M 3~	M
	电磁阀		YV	熔断器	熔断器		FU
非电量控制的继电器	速度继电器常开触头	n	SR	变压器	单相变压器		TC
	压力继电器常开触头	p	KP		三相变压器		TM

续表

类别	名称	图形符号	文字符号	类别	名称	图形符号	文字符号
灯	信号灯（指示灯）		HL	互感器	电压互感器		TV
	照明灯		EL		电流互感器		TA

参考文献



[1] 陈白宁，段智敏，刘文波. 机电传动控制基础[M]. 沈阳：东北大学出版社，2008.

[2] 齐占庆，王振臣. 机床电气控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

[3] 海心，赵华. 机电传动控制[M]. 北京：高等教育出版社，2007.

[4] 刘武发，张瑞，赵江铭. 机床电气控制[M]. 北京：化学工业出版社，2009.

[5] 宋运伟. 机床电气控制[M]. 天津：天津大学出版社，2008.

[6] 张海根. 机电传动控制[M]. 北京：高等教育出版社，2001.

[7] 苏保明. 低压电器选用手册[M]. 北京：机械工业出版社，2008.

[8] 刘劳，贾建波，张华林. 机床电气控制与 PLC[M]. 北京：国防工业出版社，2009.

[9] 刘利，王栋. 电动机软启动器实用技术[M]. 北京：中国电力出版社，2010.

[10] 杨林建. 机床电气控制技术[M]. 北京：北京理工大学出版社，2008.

[11] 郭艳萍. 电气控制与 PLC 技术[M]. 北京：北京师范大学出版社，2007.

[12] 刘祖其. 电气控制与可编程序控制器应用技术[M]. 北京：机械工业出版社，2010.

[13] 吴丽，梅杨. 电气控制与 PLC 应用技术[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

[14] FX_{1S}系列微型可编程控制器使用手册. 上海：2007.

[15] FX_{1N}系列微型可编程控制器使用手册. 上海：2007.

[16] FX_{2N}系列微型可编程控制器使用手册. 上海：2007.

[17] FX_{3U}系列微型可编程控制器用户手册(硬件篇). 上海：2010.

[18] FX 系列(FX_{1S}-FX_{1N}-FX_{2N}-FX_{2NC})编程手册——基本指令、步进梯形指令、应用指令说明书. 上海：2000.

[19] FX_{3U}-FX_{3UC}系列微型可编程控制器编程手册(基本应用指令说明书). 上海：2005.

[20] FX_{3G}-FX_{3U}-FX_{3UC}系列微型可编程控制器编程手册(基本应用指令说明书). 上海：2012.

[21] 邓星钟. 机电传动控制[M]. 第四版. 武汉：华中科技大学出版社，2007.

[22] 刘冶平，章青. 机电传动控制[M]. 天津：天津大学出版社，2007.

[23] 路敦民，王克义，崔洪斌. 机电传动及控制[M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2005.



普通高等学校机械制造及其自动化专业“十二五”规划教材

- 机械工程概论
- 机械制造技术基础
- 机械制造技术基础课程设计
- 互换性与技术测量
- 数控技术
- 机械制造装备设计
- 机械工程材料及其成形技术基础
- 机械工程材料及其成形技术基础的辅导与题解
- 机械CAD/CAE/CAM技术
- 机械制造技术训练（第二版）
- 机械制造技术训练报告（第二版）
- 机械制造工程实践
- 液压传动与气压传动
- 工程测试技术基础
- 机械工程控制基础
- 机床电气控制及PLC
- 机电一体化系统设计
- 工业机器人
- 机械制造工程学
- 机电传动控制
- 《机电传动与控制》习题精解
- 机械工程专业毕业设计指导书
- 机械制造工程训练
- 先进制造技术
- 机械工程专业英语
- 机械创新设计
- 机械设计课程设计
- 特种加工

策划编辑：俞道凯
责任编辑：王　晶　吴　晗

ISBN 978-7-5609-9642-4



定价：39.80元